

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**ESTUDI AMB CFD DEL COMPORTAMENT D'UNA
TURBINA FRANCIS AMB DANYS A LA SORTIDA DEL
RODET**



Memòria i Annexos

Autor: Victor Mora Cavaller
Director: Alfred Fontanals Garcia
Convocatòria: Juny 2020

“ESTUDI AMB CFD DEL COMPORTAMENT D'UNA TURBINA FRANCIS AMB DANYS A LA SORTIDA DEL RODET”

TFG presentat per optar al títol de GRAU en ENGINYERIA
MECÀNICA
per **Victor Mora Cavaller**

Barcelona, 10 de Juny de 2020

Director: Alfred Fontanals Garcia
Departament de Mecànica de Fluids
Universitat Politècnica de Catalunya EEBE (UPC)

Resum

El present projecte de final de grau consisteix en l'estudi del comportament d'un fluid de treball a l'interior d'una turbina Francis, la qual presenta danys a la sortida del rodet a causa del fenomen de la cavitació. Aquest estudi s'ha dut a terme mitjançant una simulació de CFD emprant el software *Ansys CFX*, el qual ens permet reproduir d'una manera fidedigne el comportament del fluid al circular per l'interior de la turbina. La turbomàquina estudiada és una reproducció a escala reduïda de la turbina real que es troba a la central hidroelèctrica reversible de l'estany Gento i Sallente, ubicada a la província de Lleida.

L'objectiu d'aquest estudi és comprendre el funcionament del fluid amb la finalitat de justificar i apreciar els diferents fenòmens que tenen lloc a l'interior de la turbina quan aquesta està malmesa.

A la present memòria s'explica de quina manera s'ha dut a terme l'estudi, el procés que s'ha seguit i les posteriors conclusions que s'han extret.

Resumen

En el presente proyecto de final de grado consiste en el estudio del comportamiento de un fluido de trabajo por el interior de una turbina Francis, la cual presenta daños en la salida del rodete a causa de la cavitación. Este estudio se ha llevado a cabo mediante una simulación en CFD usando el software *Ansys CFX*, el cual nos permite reproducir de una manera fehaciente el comportamiento del fluido al circular por el interior de la turbina. La turbomáquina estudiada es una reproducción a escala reducida de una turbina real que se encuentra en la central hidroeléctrica reversible en el pantano Gento y Sallente, ubicada en la provincia de Lérida.

El objetivo de este estudio es poder llegar a comprender mejor el funcionamiento del fluido con la finalidad de justificar y apreciar los diferentes fenómenos que se originan en el interior de la turbina cuando esta está dañada.

En la presente memoria se explica de qué manera se ha llevado a cabo el análisis, el proceso que se ha seguido y, finalmente, las conclusiones a las que se ha llegado.

Abstract

The present final degree project is based on the study of the behavior of a fluid inside a Francis turbine, which presents some damage in the outlet of the impeller produced by cavitation. This study has been done using the CFD simulator in the *Ansys CFX* software, which allows to reliably reproduce and predict the behavior of the fluid circulating inside the turbine. The studied turbomachine is a reduced-scale reproduction of a real turbine that is located in the reversible hydroelectric plant in the Gento and Sallente reservoir, in the province of Lleida.

The purpose of this study is to analyze the operation of the fluid in order to understand and justify the different phenomena that happen inside the turbine when damaged.

The present document explains in detail this analysis, the process that has been followed and, finally, the conclusions that have been reached.

Agraïments

En primera instància, voldria agrair al tutor del TFG, Alfred Fontanals Garcia, la seva dedicació i ajuda en tot moment. Agrair-li també, la possibilitat de realitzar amb ell el present projecte i la cooperació que m'ha ofert.

En segon lloc, voldria donar les gràcies a la meva parella per l'ajut i el suport incondicional, durant la confecció del present treball i durant la meva estància universitària. També, agrair a la meva família l'ajuda brindada en els moments més complicats d'aquesta etapa.

Finalment, agrair a totes aquelles persones que han estat al meu costat durant tot aquest temps a la universitat. Gràcies a tot això, l'etapa universitària s'ha fet molt més senzilla i agradable.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
ÍNDIX DE TAULES	VII
ÍNDIX D'EQUACIONS	X
ÍNDIX DE FIGURES	XII
1. INTRODUCCIÓ	27
1.1. Objectius i abast del treball	28
2. FONAMENT TEÒRIC	29
2.1. Turbines hidràuliques	29
2.1.1. Definició	29
2.1.2. Classificació	30
2.2. Turbina Francis	31
2.2.1. Context històric	31
2.2.2. Elements constituents	32
2.2.3. Règim de funcionament	36
2.3. Conceptes teòrics	37
2.3.1. Propietats dels fluids	37
2.3.2. Despreniment de la capa límit	39
2.3.3. Coeficient de Drag i Lift	41
2.3.4. Equacions fonamentals	42
2.3.5. Principi de Bernoulli	44
2.4. CFD	45
2.4.1. Què és el CFD	45
2.4.2. Com funciona el CFD	46
2.4.3. Models de turbulència	49
2.4.4. Fonts d'error en la simulació numèrica de turbomàquines	49
2.5. Fenòmens a l'interior d'una turbina Francis	52
2.5.1. Interacció rotor-estator (RSI)	52
2.5.2. Cavitació	54

2.5.3.	Erosió per partícules sòlides	59
3.	DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE	61
3.1.	FASE 1. Definició de l'objecte d'estudi	61
3.2.	FASE 2. Disseny de les geometries del rodet	64
3.2.1.	Lleis de semblança aplicades a la turbina.....	65
3.2.2.	Geometries a simular	68
3.3.	FASE 3. Elaboració de les malles.....	70
3.4.	FASE 4. Configuració de les simulacions	76
3.4.1.	Paràmetres generals	76
3.4.2.	Condicions de contorn i configuració del <i>Setup</i>	78
3.4.3.	Monitors.....	90
4.	RESULTATS DE LA SIMULACIÓ	94
4.1.	Resultats gràfics al <i>CFD-Post</i>	94
4.1.1.	Visió general de la turbina Francis.....	95
4.1.2.	Anàlisi del rodet	100
4.2.	Anàlisis dels monitors	113
4.2.1.	Monitors de <i>drag</i> i <i>lift</i>	115
4.2.2.	Monitors al rotor.....	121
4.2.3.	Monitors a l'estator	125
4.2.4.	Monitors a les <i>interfaces</i> (IF)	129
4.2.5.	Monitors al tub d'aspiració.....	136
4.2.6.	Resultats del parell motor.....	143
	CONCLUSIONS	145
	PRESSUPOST	147
	BIBLIOGRAFIA	149
	ANNEX A	152
A1.	Resultats gràfics no inclosos a la memòria	152
A1.1.	Geometria original	152
A1.2.	Geometria amb un àlep danyat	156
A1.3.	Geometria amb tots els àleps danyats	160
A2.	Resultats monitors	164
A2.1.	Geometria original	164
A2.2.	Geometria amb un àlep danyat	173
A2.3.	Geometria amb tots els àleps danyats	180

Índex de taules

Taula 1. Dades turbina original. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	64
Taula 2. Dades turbina model. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	65
Taula 3. Dades turbina model per introduir a l'Ansys. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	67
Taula 4. Paràmetres comuns a les simulacions. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	77
Taula 5. Paràmetres segons la geometria. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	77
Taula 6. Expressions per calcular forces de <i>drag</i> i <i>lift</i> . -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	90
Taula 7. Coordenades i característiques dels monitors. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	91
Taula 8. Nous monitors al tub d'aspiració. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	92
Taula 9. Harmònics per la identificació del RSI. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	114
Taula 10. Valors mitjans de forces de <i>drag</i> als àleps del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	116
Taula 11. Valors mitjans de forces de <i>drag</i> als <i>guidevanes</i> . -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	116
Taula 12. Valors mitjans de forces de <i>lift</i> als àleps del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	117
Taula 13. Valors mitjans de forces de <i>lift</i> als <i>guidevanes</i> . -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	118
Taula 14. Freqüències de <i>drag</i> al àleps del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	119
Taula 15. Freqüències de <i>drag</i> als <i>guidevanes</i> . -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	119
Taula 16. Freqüències de <i>lift</i> al àleps del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	119
Taula 17. Freqüències de <i>lift</i> als <i>guidevanes</i> . -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	120
Taula 18. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor1. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	121

Taula 19. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor2. -Font: Elaboració pròpia.	122
Taula 20. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor3. -Font: Elaboració pròpia.	123
Taula 21. Freqüències al Rotor1. -Font: Elaboració pròpia.	124
Taula 22. Freqüències al Rotor2. -Font: Elaboració pròpia.	124
Taula 23. Freqüències al Rotor3. -Font: Elaboració pròpia.	124
Taula 24. Valors mitjans de pressions al monitor Estator1. -Font: Elaboració pròpia.	125
Taula 25. Valors mitjans de pressions al monitor Estator2. -Font: Elaboració pròpia.	126
Taula 26. Valors mitjans de pressions al monitor Estator3. -Font: Elaboració pròpia.	127
Taula 27. Freqüències a l'Estator1. -Font: Elaboració pròpia.	128
Taula 28. Freqüències a l'Estator2. -Font: Elaboració pròpia.	128
Taula 29. Freqüències a l'Estator3. -Font: Elaboració pròpia.	128
Taula 30. Valors mitjans de pressions al monitor IF1. -Font: Elaboració pròpia.	129
Taula 31. Valors mitjans de pressions al monitor IF2. -Font: Elaboració pròpia.	130
Taula 32. Valors mitjans de pressions al monitor IF3. -Font: Elaboració pròpia.	131
Taula 33. Valors mitjans de pressions al monitor IF4. -Font: Elaboració pròpia.	132
Taula 34. Valors mitjans de pressions al monitor IF5. -Font: Elaboració pròpia.	133
Taula 35. Freqüències a la interface IF1. -Font: Elaboració pròpia.	134
Taula 36. Freqüències a la interface IF2. -Font: Elaboració pròpia.	134
Taula 37. Freqüències a la interface IF3. -Font: Elaboració pròpia.	134

Taula 38. Freqüències a la <i>interface</i> IF4. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	135
Taula 39. Freqüències a la <i>interface</i> IF5. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	135
Taula 40. Valors mitjans de pressions al monitor Tube1. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	136
Taula 41. Valors mitjans de pressions al monitor Tube2. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	137
Taula 42. Valors mitjans de pressions al monitor Tube3. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	138
Taula 43. Valors mitjans de pressions al monitor Tube4. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	139
Taula 44. Valors mitjans de pressions al monitor Tube5. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	140
Taula 45. Valors mitjans de pressions als nous monitors (Tub1 i Tub2). -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	142
Taula 46. Valors mitjans de parell motor al rotor i la potència subministrada. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	143
Taula 47. Freqüències del parell motor. -Font: <i>Elaboració pròpia.</i>	144

Índex d'equacions

Equació (1)	37
Equació (2)	38
Equació (3)	39
Equació (4)	40
Equació (5)	40
Equació (6)	41
Equació (7)	41
Equació (8)	42
Equació (9)	42
Equació (10)	43
Equació (11)	43
Equació (12)	43
Equació (13)	43
Equació (14)	44
Equació (15)	44
Equació (16)	45
Equació (17)	56
Equació (18)	65

Equació (19)	66
Equació (20)	66
Equació (21)	66
Equació (22)	66
Equació (23)	66
Equació (24)	67
Equació (25)	67
Equació (26)	73
Equació (27)	76
Equació (28)	76
Equació (29)	76
Equació (30)	110
Equació (31)	111
Equació (32)	114
Equació (33)	114
Equació (34)	114

Índex de figures

Figura 1. Estany Gento. - Font: Recuperat de www.rutespirineus.cat	28
Figura 2. Configuració habitual turbines Francis. - Font: Recuperat de www.descubrelaenergia.es	29
Figura 3. Rodet turbina Kaplan (esquerra) i Francis (dreta). - Font: Recuperat de www.ahydro.com	30
Figura 4. Rodet turbina Pelton. -Font: Recuperat de www.strojirnybrno.com	31
Figura 5. Acoplament del rodet a la central. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	31
Figura 6. Flux radial (a) i flux axial-radial (b). -Font: Recuperat de www.ingelibreblog.wordpress.com .	32
Figura 7. Voluta. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	32
Figura 8. Àleps mòbils d'una turbina Francis. -Font: Recuperat de www.faeitch2012.wordpress.com .	33
Figura 9. Rotor lent (esquerra) i rotor normal (dreta). -Font: Fernández Díez, Pedro. <i>Turbinas Francis</i> .	34
Figura 10. Rotor ràpid -Font: Fernández Díez, Pedro. <i>Turbinas Francis</i> .	34
Figura 11. Turbina Francis amb els seus components principals -Font: Recuperat de www.gdc.design/danielleduranleau.com .	35
Figura 12. Taula selecció turbines en funció de la velocitat específica (rpm) i l'altura del salt (m). -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	36
Figura 13. Flux turbulent i flux laminar. -Font: Recuperat de www.reactor-physics.com .	38
Figura 14. Desenvolupament de la capa límit sobre una placa plana. -Font: Recuperat de www.nuclear-power.net.com .	39

Figura 15. Representació de les forces de <i>Drag</i> i de <i>Lift</i> . -Font: Recuperat de www.comsol.com .	41
Figura 16. Principi de Bernoulli. -Font: Recuperat de www.experimentoscientificos.es .	45
Figura 17. Domini discretitzat en petits volums de control. -Font: Recuperat de www.simulacionesyproyectos.com .	47
Figura 18. Fonts d'error i divisió d'una tasca a CFD. -Font: Laín Beatove, Santiago. (2006). <i>Simulación numérica en turbina Francis</i> .	50
Figura 19. Interacció RSI. -Font: Recuperat de www.mcgill.com .	53
Figura 20. Interacció del deixant. -Font: Recuperat de www.mcgill.com .	53
Figura 21. Danys produïts per la cavitació. -Font: Recuperat de www.ingenieromarino.com .	55
Figura 22. Diferents formes de col·lapse. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	56
Figura 23. Esquema d'una instal·lació hidroelèctrica.	56
Figura 24. Efecte de l'erosió de la cavitació de bombolles. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	57
Figura 25. Torxa observada al tub d'aspiració en un banc de proves. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). <i>Detección de cavitación en turbina Francis</i> .	58
Figura 26. Forces que actuen sobre les partícules en un camp fluid.	59
Figura 27. Mecanismes d'erosió. a) Tall per abrasió; b) Fatiga superficial; c) Deformació plàstica; d) Fractura fràgil.	60
Figura 28. Geometria de l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	61
Figura 29. Geometria del rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	62
Figura 30. Geometria del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	62

Figura 31. Geometria emprada per a la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	63
Figura 32. Rotor original. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	68
Figura 33. Rotor amb un àlep malmès. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	68
Figura 34. Rotor amb tots els àleps malmesos. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	69
Figura 35. Configuració del <i>Face Sizing</i> a la sortida, a l'entrada i als àleps respectivament (un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	71
Figura 36. Configuració del <i>Face Sizing</i> a la sortida, a l'entrada i als àleps respectivament (tots àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	71
Figura 37. Capes del <i>Inflation</i> al voltant dels àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	72
Figura 38. Configuració del <i>Inflation</i> per a un àlep malmès VS tots malmesos. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	74
Figura 39. Configuració general de les malles. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	74
Figura 41. Malla rotor amb tots els àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	75
Figura 40. Malla rotor amb un àlep danyat. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	75
Figura 42. <i>Setup</i> de la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	76
Figura 43. <i>Setup</i> amb la geometria a simular. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	78
Figura 44. Dominis al <i>Setup</i> . -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	78
Figura 45. <i>Interfaces</i> al <i>Setup</i> . -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	79
Figura 46. Configuració <i>Interface</i> estator-rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	79
Figura 47. Configuració <i>Interface</i> rotor-tube. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	79

Figura 48. Configuració de l'estator (<i>Basic Settings</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	80
Figura 49. Configuració de l'estator (<i>Fluid Models i Initialization</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	80
Figura 50. Subdominis de l'estator. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	81
Figura 51. Configuració subdomini dels àleps de l'estator. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	81
Figura 52. Configuració entrada fluid a l'estator. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	82
Figura 53. Configuració sortida fluid a l'estator. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	82
Figura 54. Configuració parets de l'estator. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	83
Figura 55. Configuració del rotor (<i>Basic Settings</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	83
Figura 56. Configuració del rotor (<i>Fluid Models i Initialization</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	84
Figura 57. Subdominis del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	84
Figura 58. Configuració àleps rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	85
Figura 59. Configuració entrada fluid al rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	85
Figura 60. Configuració parets del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	86
Figura 61. Configuració de la sortida del fluid del rotor. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	86
Figura 62. Configuració del tub d'aspiració (<i>Basic Settings</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	87
Figura 63. Configuració del tub d'aspiració (<i>Fluid Models i Initialization</i>). -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	87
Figura 64. Subdominis del tub d'aspiració. -Font: <i>Elaboració pròpia amb Ansys CFX.</i>	88

Figura 65. Configuració de les parets del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.88	
Figura 66. Configuració de l'entrada del fluid al tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	
_____	89
Figura 67. Configuració de la sortida del fluid del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	
_____	89
Figura 68. Introducció dels monitors. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	92
Figura 69. Vista en el pla Z0 dels monitors. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	93
Figura 70. Vista en el pla Y0 del monitors al tub. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	93
Figura 71. Results de la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	94
Figura 72. Pressions de l'estator i el rotor (pla Z0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	95
Figura 73. Pressions de l'estator i el rotor (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	96
Figura 74. Pressions de l'estator, rotor i tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	96
Figura 75. Velocitats a l'estator i al rotor (pla Z0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	97
Figura 76. Velocitats a l'estator, rotor i al tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	98
Figura 77. Línies de corrent en vista isomètrica. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	99
Figura 78. Línies de corrent en vista posterior. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	99
Figura 79. Contorn de pressions de les tres simulacions a les parets dels àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	100
Figura 80. Pressions al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	101

Figura 81. Velocitats al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	103
Figura 82. Detall velocitat contorn àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	104
Figura 83. Turbulència relativa a l'energia cinètica del fluid al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	105
Figura 84. Detall turbulència contorn àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	106
Figura 85. Vectors de velocitat al rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	107
Figura 86. Vectors de força al rotor . -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	108
Figura 87. Vector de força al rotor (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	109
Figura 88. Taula de les propietats de l'aigua saturada en funció de la temperatura. -Font: Recuperat de www.ocw.unican.es . _____	111
Figura 89. Cavitació al rotor (vista isomètrica). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. ____	112
Figura 90. Cavitació al rotor i al tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.	112
Figura 91. Forces de <i>drag</i> als àleps del rotor en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia. ____	115
Figura 92. Forces de <i>drag</i> als <i>guidevanes</i> en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia. _____	116
Figura 93. Forces de <i>lift</i> als àleps del rotor en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia. _____	117
Figura 94. Forces de <i>lift</i> als <i>guidevanes</i> en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia. ____	118
Figura 95. Valors de pressió dels tres casos al Rotor1. -Font: Elaboració pròpia. ____	121
Figura 96. Valors de pressió dels tres casos al Rotor2. -Font: Elaboració pròpia. _____	122
Figura 97. Valors de pressió dels tres casos al Rotor3. -Font: Elaboració pròpia. ____	123
Figura 98. Valors de pressió dels tres casos a l'Estator1. -Font: Elaboració pròpia. _____	125

Figura 99. Valors de pressió dels tres casos a l'Estat2. -Font: Elaboració pròpia. _____	126
Figura 100. Valors de pressió dels tres casos a l'Estat3. -Font: Elaboració pròpia. _____	127
Figura 101. Valors de pressió dels tres casos al IF1. -Font: Elaboració pròpia. _____	129
Figura 102. Valors de pressió dels tres casos al IF2. -Font: Elaboració pròpia. _____	130
Figura 103. Valors de pressió dels tres casos al IF3. -Font: Elaboració pròpia. _____	131
Figura 104. Valors de pressió dels tres casos al IF4. -Font: Elaboració pròpia. _____	132
Figura 105. Valors de pressió dels tres casos al IF5. -Font: Elaboració pròpia. _____	133
Figura 106. Valors de pressió dels tres casos al Tube1. -Font: Elaboració pròpia. _____	136
Figura 107. Valors de pressió dels tres casos al Tube2. -Font: Elaboració pròpia. _____	137
Figura 108. Valors de pressió dels tres casos al Tube3. -Font: Elaboració pròpia. _____	138
Figura 109. Valors de pressió dels tres casos al Tube4. -Font: Elaboració pròpia. _____	139
Figura 110. Valors de pressió dels tres casos al Tube5. -Font: Elaboració pròpia. _____	140
Figura 111. Valors de pressió als nous monitors al tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia. ____	142
Figura 112. Valors de parell motor al rotor. -Font: Elaboració pròpia. _____	143
Figura 113. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	152
Figura 114. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	153
Figura 115. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX. _____	153

- Figura 116. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 154
- Figura 117. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 154
- Figura 118. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 155
- Figura 119. Contorn de pressió del sistema (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 155
- Figura 120. Contorn de velocitat del sistema (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 156
- Figura 121. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 156
- Figura 122. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 157
- Figura 123. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 157
- Figura 124. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 158
- Figura 125. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 158
- Figura 126. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 159
- Figura 127. Contorn de pressió del sistema (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 159

- Figura 128. Contorn de velocitat del sistema (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 160
- Figura 129. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 160
- Figura 130. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 161
- Figura 131. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 161
- Figura 132. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 162
- Figura 133. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 162
- Figura 134. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 163
- Figura 135. Contorn de pressió del sistema (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 163
- Figura 136. Contorn de velocitat del sistema (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.* _____ 164
- Figura 137. Freqüències del monitor Drag als àleps (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 164
- Figura 138. Freqüències del monitor Drag guidevanes (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 165
- Figura 139. Freqüències del monitor IF1 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* 165
- Figura 140. Freqüències del monitor IF2 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* 166

Figura 141. Freqüències del monitor IF3 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*166

Figura 142. Freqüències del monitor IF4 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*167

Figura 143. Freqüències del monitor IF5 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*167

Figura 144. Freqüències del monitor Lift àleps (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 168

Figura 145. Freqüències del monitor Lift guidevanes (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 168

Figura 146. Freqüències monitor Rotor1 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*168

Figura 147. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 169

Figura 148. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 169

Figura 149. Freqüències del monitor Estator1 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 169

Figura 150. Freqüències del monitor Estator2 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 170

Figura 151. Freqüències del monitor Estator3 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 170

Figura 152. Freqüències del monitor Tube1 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 170

Figura 153. Freqüències del monitor Tube2 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 171

Figura 154. Freqüències del monitor Tube3 (geometria original). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.*
_____ 171

Figura 155. Freqüències del monitor Tube4 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	171
Figura 156. Freqüències del monitor Tube5 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	172
Figura 157. Freqüències del parell motor del rodet (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	172
Figura 158. Freqüències del monitor Drag àleps (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	173
Figura 159. Freqüències del monitor Drag guidevanes (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	173
Figura 160. Freqüències del monitor IF1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	173
Figura 161. Freqüències del monitor IF2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	174
Figura 162. Freqüències del monitor IF3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	174
Figura 163. Freqüències del monitor IF4 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	174
Figura 164. Freqüències del monitor IF5 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	175
Figura 165. Freqüències del monitor Lift àleps (geometria d'una àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	175
Figura 166. Freqüències del monitor Lift guidevanes (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	175
Figura 167. Freqüències del monitor Rotor1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.	176

- Figura 168. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 176
- Figura 169. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 176
- Figura 170. Freqüències del monitor Estator1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 177
- Figura 171. Freqüències del monitor Estator2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 177
- Figura 172. Freqüències del monitor Estator3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 177
- Figura 173. Freqüències del monitor Tube1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 178
- Figura 174. Freqüències del monitor Tube2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 178
- Figura 175. Freqüències del monitor Tube3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 178
- Figura 176. Freqüències del monitor Tube4 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 179
- Figura 177. Freqüències del monitor Tube5 (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 179
- Figura 178. Freqüències del parell motor del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 179
- Figura 179. Freqüències del monitor *Drag* àleps (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 180

- Figura 180. Freqüències del monitor *Drag guidevane* (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 180
- Figura 181. Freqüències del monitor IF1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 181
- Figura 182. Freqüències del monitor IF2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 181
- Figura 183. Freqüències del monitor IF3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 181
- Figura 184. Freqüències del monitor IF4 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 182
- Figura 185. Freqüències del monitor IF5 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 182
- Figura 186. Freqüències del monitor *Lift àleps* (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 182
- Figura 187. Freqüències del monitor *Lift guidevane* (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 183
- Figura 188. Freqüències del monitor Rotor1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 183
- Figura 189. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 184
- Figura 190. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 184
- Figura 191. Freqüències del monitor Estator1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 184

- Figura 192. Freqüències del monitor Estator2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 185
- Figura 193. Freqüències del monitor Estator3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 185
- Figura 194. Freqüències del monitor Tube1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 186
- Figura 195. Freqüències del monitor Tube2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 186
- Figura 196. Freqüències del monitor Tube3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 186
- Figura 197. Freqüències del monitor Tube4 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 187
- Figura 198. Freqüències del monitor Tube5 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 187
- Figura 199. Freqüències del monitor Tub1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 187
- Figura 200. Freqüències del monitor Tub2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 188
- Figura 201. Freqüències del parell motor al rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: *Elaboració pròpia amb Scilab.* _____ 188

1. Introducció

Tothom, avui en dia, és conscient que un món on hi predominen els combustibles fòssils té data de venciment. Això es degut a que són combustibles finits i, majoritàriament, molt nocius cap al medi ambient. És per això, que cada cop més, les energies renovables estan i estaran més presents, ja que això resulta un fet indispensable per la supervivència de la humanitat en un futur.

L'obtenció de l'energia elèctrica a través de l'aigua, entesa com energia hidràulica, cada vegada s'està tenint més en compte a l'hora d'intentar combatre la dependència tan nociva que es té amb els combustibles fòssils, com el carbó, el petroli, etc. Això és degut a que l'energia hidroelèctrica és una font neta i renovable, donat que tan sols utilitza la força de l'aigua. Per exemple, a nivell mundial, al 2017 es van evitar aproximadament 4 mil milions de tones de gasos d'efecte hivernacle i es van reduir un 10% les emissions mundials de combustibles fòssils gràcies a l'augment de l'ús de l'energia hidràulica. És per això, que l'estudi del disseny i la construcció de turbines hidràuliques s'està convertint en un factor important per tal de poder-les optimitzar i, així, obtenir-ne millors rendiments. Cal esmentar però, que aconseguir una bona eficiència requereix d'un gran esforç enginyeril, ja que les turbines hidràuliques usualment són productes individuals i únics que estan dissenyats per a unes condicions específiques, tals com l'altura de salt, el cabal i la descàrrega.

L'estudi en CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ens permet fer simulacions d'un fluid al circular per l'interior d'una geometria, podent extreure prediccions i càlculs precisos del seu comportament. Això permet optimitzar en gran mesura el temps i obtenir informació rellevant de manera econòmica, ja que, antigament, per obtenir la mateixa informació s'havia d'invertir gran quantitat de capital i temps. Per aquest motiu, resulta bàsic poder arribar a entendre què passa a l'interior d'una turbina o turbomàquina: el fregament del fluid amb les parets i la generació de turbulències, entre d'altres. No obstant, el flux d'una turbina és extremadament complex, ja que generalment és turbulent i no estacionari. Per aquestes raons, la simulació numèrica i la predicció del flux és una tasca molt exigent i no està exempta de dificultats. Per això, si s'aconsegueix entendre bé tots aquets factors, es podrà arribar de manera més eficaç i eficient al disseny òptim, doncs un canvi de mil·límetres en la geometria, pot arribar a significar un augment de la vida útil i un benefici econòmic substancial.

1.1. Objectius i abast del treball

L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar i recopilar informació sobre el comportament del fluid al passar per l'interior d'una turbina Francis i veure com afecten diversos danys a la sortida del rotor mitjançant simulacions CFD, per tal de que els resultats i conclusions obtinguts en aquest projecte puguin resultar d'utilitat pel manteniment i la prevenció de possibles problemes a turbines semblants.

La turbina a estudiar és una turbina Francis ubicada a la central hidroelèctrica reversible del pantà de Sallente, Pallars Jussà. Cal mencionar que és la primera central reversible de Catalunya i produeix al voltant d'uns 415 MW. Aquesta energia és produïda per la força de l'aigua que baixa per les canonades des de l'Estany Gento (veure Figura 1), i durant la nit bombeja l'aigua del pantà de Sallente novament a l'estany Gento. Pujar l'aigua de nou al pantà de Sallente requereix un 30% més de kW que els obtinguts durant la baixada, però com la pujada s'efectua per la nit, quan els kW són més econòmics, la rendibilitat està assegurada. L'energia que empra durant el procés de bombeig procedeix de les centrals nuclears.



Figura 1. Estany Gento. - Font: Recuperat de www.rutespireus.cat

Es realitzaran diverses simulacions intentant englobar diferents escenaris de danys possibles que pot patir la turbina. Els escenaris seran l'estudi del rotor amb dany a la sortida d'un àlep i posteriorment amb tots els àleps malmesos a la sortida. La informació obtinguda, es contrastarà amb els resultats de la turbina en perfecte estat, per tal d'extreure conclusions de com poden afectar danys d'aquets tipus. Les simulacions es realitzaran amb el programa Ansys CFX. Per l'estudi es contemplaran diversos fenòmens com la cavitació, la interacció rotor-estator (RSI), les variacions de pressió i velocitat, el desprendiment de la capa límit i el fregament amb les parets de l'interior de la turbina, entre d'altres.

2. Fonament teòric

En aquets capítol es farà menció als aspectes teòrics útils per a la millor comprensió i contextualització del present treball.

2.1. Turbines hidràuliques

2.1.1. Definició

Una turbina és una màquina hidràulica receptora que transforma l'energia hidràulica en energia mecànica mitjançant el pas d'un fluid pel seu interior. Té com a element principal un rodet, el qual gira gràcies al impuls d'un fluid (màquina motora), o fa que un fluid surti impulsat gràcies a la seva rotació (màquina operadora). Pertanyen al subgrup de les turbomàquines motores.

Reben el nom de turbina hidràulica aquelles turbines en les quals el fluid de treball no pateix canvis significatius de densitat (fluid incompressible). Quan el fluid és compressible, se les anomena turbines tèrmiques (turbines de vapor, gas). Les turbines hidràuliques són instal·lades a centrals hidroelèctriques on aprofiten l'energia acumulada en un salt d'aigua per generar electricitat a través d'un alternador solidari amb l'eix de la turbina. A la Figura 2 es pot veure el funcionament d'una turbina Francis.

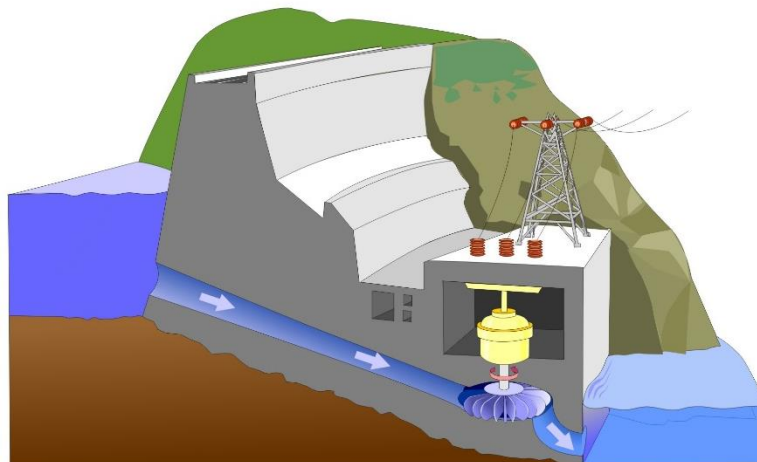


Figura 2. Configuració habitual turbines Francis. - Font: Recuperat de www.descubrelaenergia.es

2.1.2. Classificació

Les turbines es poden classificar en funció de diferents paràmetres (cabal, salt disponible, direcció del fluid a l'entrada del rotor de la turbina, etc.).

Segons el cabal i el salt disponible, es poden distingir dos grups: *turbines de reacció* i *turbines d'acció o d'impuls*.

- **Turbines de reacció:** Són aquelles que extreuen la potència a partir de l'acció combinada de l'energia cinètica i la pressió exercida pel fluid. Per tant, una turbina serà de reacció quan el fluid de treball pateixi canvis de pressió significatius durant el seu pas per la turbina. Les turbines de reacció més famoses són les turbines Francis i Kaplan (veure Figura 3). Habitualment, les turbines Francis s'instal·len quan hi ha salts d'aigua mitjans i cabals relativament elevats. D'altra banda, les turbines Kaplan, són òptimes en condicions de salts d'aigua molt petits i cabals notables.

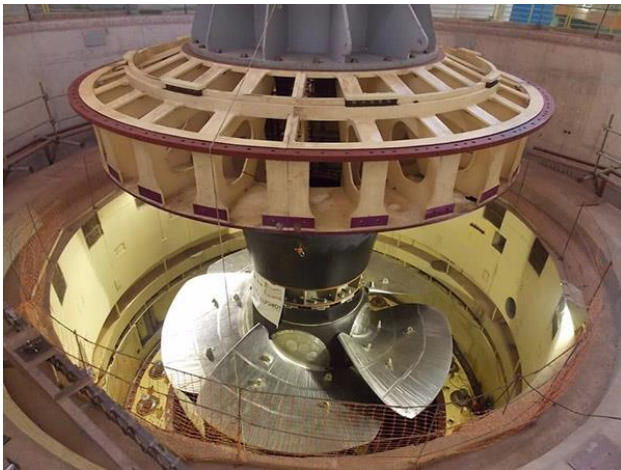


Figura 3. Rodet turbina Kaplan (esquerra) i Francis (dreta). - Font: Recuperat de www.ahydro.com

- **Turbines d'impuls:** Obtenen la potència a partir de l'energia cinètica d'un o més rajos d'aigua a velocitats considerablement altes. D'aquesta manera, una turbina serà d'acció quan el fluid de treball no sofreixi grans canvis de pressió al recórrer l'interior de la turbina. Dins d'aquest grup trobem únicament les turbines Pelton (veure **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que s'empren quan hi ha salts d'aigua molt elevats i cabals relativament baixos.

Prenent com a criteri de classificació la direcció del fluid quan aquest entra al rotor de la turbina, podem diferenciar d'entre tres tipus: turbines de flux axial, de flux radial i de flux mixt.

- **Turbines de flux axial:** Són aquelles en què el fluid de treball sempre segueix una direcció paral·lela a l'eix de gir de la turbomàquina.
- **Turbines de flux radial:** La direcció d'entrada del fluid és perpendicular a l'eix de gir.

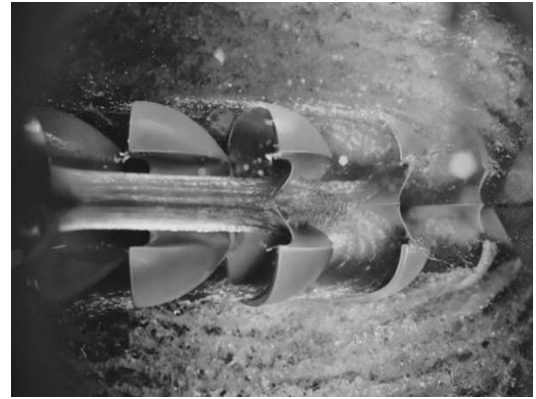


Figura 4. Rodet turbina Pelton. -Font: Recuperat de www.strojirnybrno.com

- **Turbines de flux mixt:** La direcció del flux a l'entrada del rotor de la turbina és una combinació dels anteriors.

2.2. Turbina Francis

2.2.1. Context històric

La primera turbina de reacció que es va posar en marxa va ser al voltant de l'any 1849 per l'enginyer britànic-nord-americà James Bicheno Francis, que va aconseguir gairebé un 90% d'eficiència en el disseny i desenvolupament d'una turbina.

Inicialment, el rodet presentava un flux radial, amb els mateixos radis d'entrada i sortida per totes les línies de corrent. Més tard, va sorgir la necessitat de que les turbines gressin a velocitats més elevades i, per tant, majors potències.



Figura 5. Acoplament del rodet a la central. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). *Detección de cavitación en turbina Francis*.

Per tal de no haver d'augmentar el diàmetre del rodete, es va optar per a que el flux seguís una direcció axial-radial i, així, satisfer les necessitats esmentades anteriorment.

El resultat d'això va ser el tipus de turbina de flux mixt que, en l'actualitat, és el més habitual. Tot i que les turbines modernes guarden poca semblança amb la Francis original, el principi de funcionament és pràcticament el mateix i, per tant, s'ha conservat en nom.

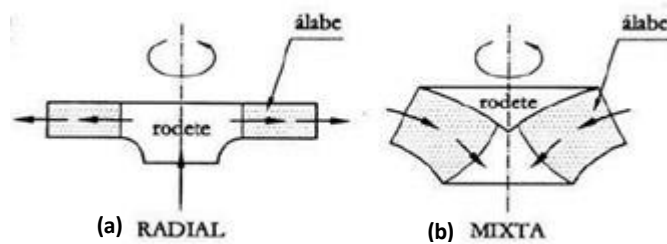


Figura 6. Flux radial (a) i flux axial-radial (b). -Font: Recuperat de www.ingelibreblog.wordpress.com.

Les turbines Francis es poden dissenyar per operar en un ampli rang de salts i cabals, sent capaces d'operar en desnivells que varien d'entre els dos metres fins als centenars. Per aquest motiu, juntament amb la seva alta eficiència (al voltant del 95%), és de les turbines més emprades arreu del món per a la producció d'energia elèctrica a centrals hidràuliques.

2.2.2. Elements constituents

Els elements principals d'una turbina Francis són:

- **Conducte d'entrada:** Canonada per la qual entra aigua a alta pressió dins la màquina,.
- **Voluta o càmera espiral:** Conducte pel qual arriba l'aigua del conducte d'entrada, distribuint-la uniformement per tot el perímetre de l'entrada de l'estator. Mitjançant la seva característica forma de caragol (veure Figura 7) va reduint la secció de pas del fluid gradualment, conferint-li major pressió i velocitat.

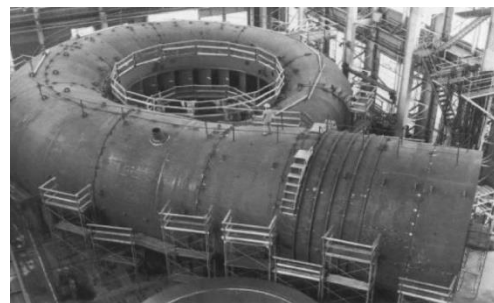


Figura 7. Voluta. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). *Detección de cavitación en turbina Francis*.

- **Estator o distribuïdor:** Peça que conté el conjunt d'àleps directrius, disposats en forma circular per regular el cabal d'aigua que arriba de la voluta i dirigir el fluid al voltant de l'entrada del rodet. Si bé en turbines antigues els àleps directrius eren estàtics, en la majoria de turbines actuals també hi ha àleps mòbils orientables. D'aquesta manera, és possible controlar d'una manera més eficient el rendiment de la màquina, doncs el fluid és dirigit cap als àleps del rotor amb la direcció òptima. A la Figura 8, es poden apreciar els àleps directrius juntament amb el rotor d'una turbina Francis.

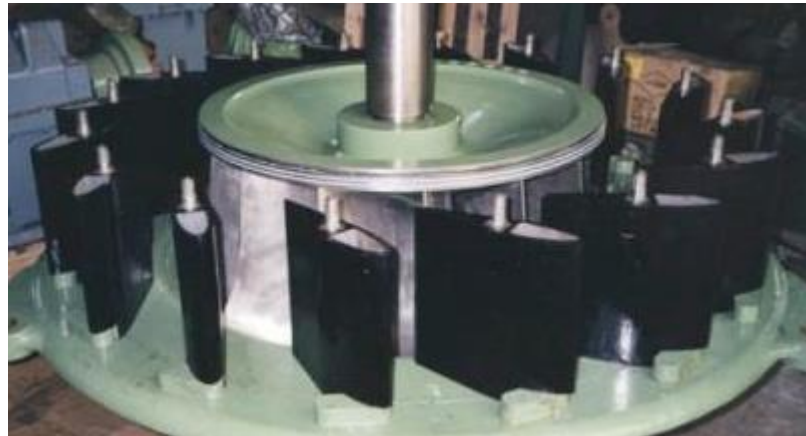


Figura 8. Àleps mòbils d'una turbina Francis. -Font: Recuperat de www.faeitch2012.wordpress.com.

- **Rotor o rodet:** Es tracta de la peça fonamental per la qual s'obté l'energia mecànica. Gira solidàriament amb l'eix de la turbina i és perfectament concèntric amb l'estator. El rodet està constituït per un número concret d'àleps a través dels quals passa l'aigua, fent-lo girar. El rodet pot tenir diverses formes en funció del número específic de revolucions pel qual estigui dissenyada la màquina que, a la vegada, depèn del salt del fluid i del cabal de disseny. Es poden diferenciar entre tres tipus de rodets: lents, normals i ràpids. Els lents s'empren per a grans salts i cabals petits i el número de revolucions al que giren és petit. En aquest cas el diàmetre del rodet és major al diàmetre del tub d'aspiració. Pel que fa als rodets normals, estan dissenyats per a salts i cabals moderats i el número de revolucions al que giren no és gaire alt. Així mateix, el diàmetre del rodet i el del tub d'aspiració són molt similars. Per últim, els rodets ràpids estan dissenyats per a petits salts i grans cabals, el número de revolucions al que giren és bastant considerable i el diàmetre del rodet és menor al diàmetre del tub d'aspiració.

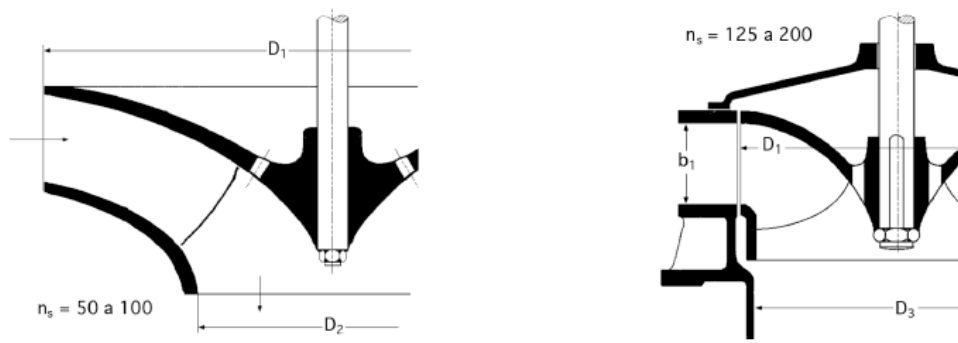


Figura 9. Rotor lent (esquerra) i rotor normal (dreta). -Font: Fernández Díez, Pedro. Turbinas Francis.

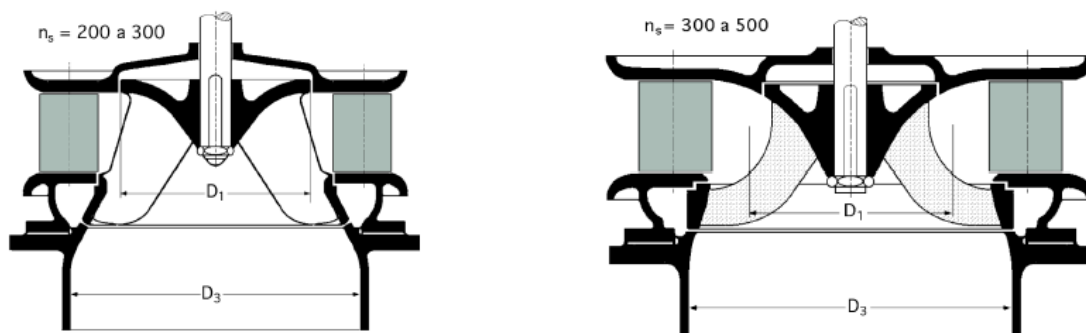


Figura 10. Rotor ràpid -Font: Fernández Díez, Pedro. Turbinas Francis.

- **Tub d'aspiració:** Conduïte, normalment amb un colze, per on és evacuada l'aigua a baixa pressió. Té com a finalitat recuperar al màxim l'energia cinètica de l'aigua a la sortida del rotor. En general, es construeixen en forma de difusor, per així, augmentar l'àrea de pas i disminuir la velocitat del fluid. D'aquesta manera s'aconsegueix obtenir una pressió atmosfèrica a la sortida del tub d'aspiració, el que garanteix una bona connexió entre la sortida de la turbina i el dipòsit de sortida.
- **Eix:** Peça central que dona voltes solidàriament amb el rotor. Al girar el rodet, rota l'eix i, consegüentment, el generador ubicat a la part superior de l'eix.

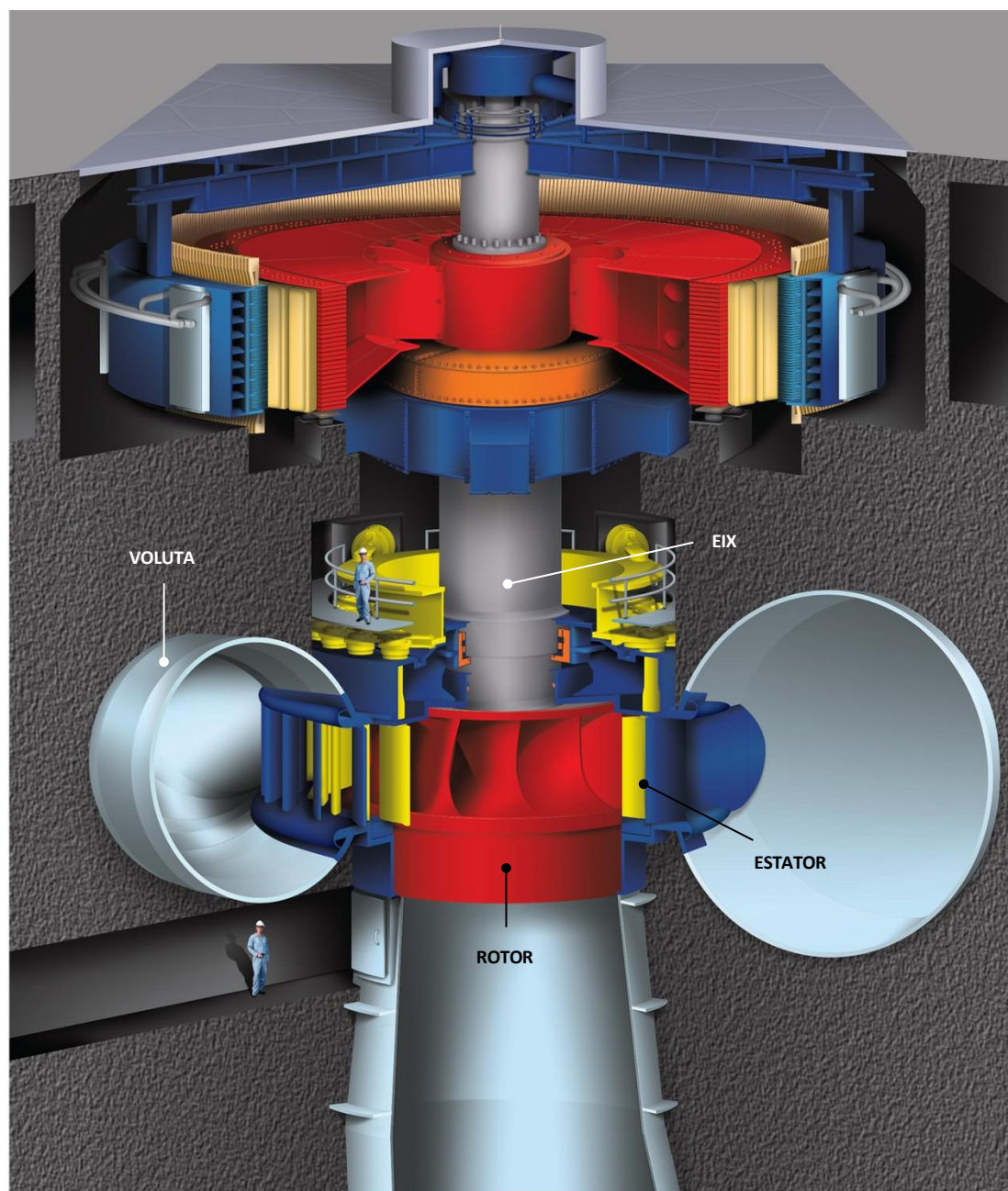


Figura 11. Turbina Francis amb els seus components principals -Font: Recuperat de www.gdc.design/danielleduranleau.com.

2.2.3. Règim de funcionament

El funcionament de la turbina és el següent: el fluid és conduït, a través del conducte d'entrada, des de la presa fins l'entrada de la turbina. Tot seguit, el fluid omple la voluta i es dirigeix a l'interior del rodet a través dels àleps directrius de l'estator. Un cop entra al rodet, l'energia que porta el fluid és una suma de l'energia cinètica, l'energia deguda a la pressió i l'energia potencial. La turbina converteix aquesta suma en energia mecànica, la qual es manifesta amb el gir del rodet. D'aquesta manera, gira també l'eix solidari que, a la vegada, fa girar el generador elèctric ubicat a la part superior de l'eix, on es realitza la conversió final en energia elèctrica. Finalment, un cop el fluid ha passat pel rodet, surt de la turbina a través del tub d'aspiració i arriba al dipòsit inferior.

L'elecció de la turbina es realitza en funció de les condicions que es tenen en cada cas, contemplant dos paràmetres bàsics: l'altura de salt i la velocitat específica¹ o cabal. Així mateix, el tipus de rodet també ve determinat en funció d'aquests paràmetres (veure Figura 12).

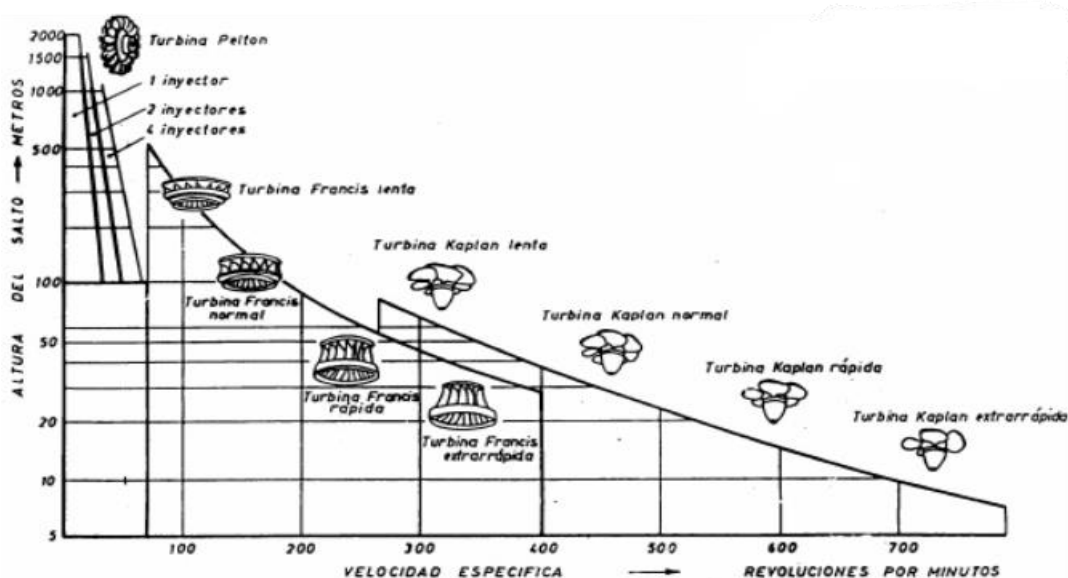


Figura 12. Taula selecció turbines en funció de la velocitat específica (rpm) i l'altura del salt (m). -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). *Detección de cavitación en turbina Francis*.

¹ Aquella velocitat a la qual gira un model geomètricament semblant a la turbina real o prototip ($N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_n^{1,25}}$) on N és la velocitat de rotació (rpm), P la potencia de la turbina (kW) i H_n el salt net en metres.

Tot i això, és recomanable moure's entre els següents valors per tal de aconseguir un correcte funcionament:

- Un salt d'entre els 18 i 520 metres
- Cabals d' 1 a $700 \frac{m^3}{s}$.
- Potències de 0,1 a 80 MW.

2.3. Conceptes teòrics

En aquest capítol es profunditzarà en alguns conceptes de la mecànica de fluids que ajudaran a la millor comprensió del present projecte.

2.3.1. Propietats dels fluids

2.3.1.1. Nombre de Reynolds

El nombre de Reynolds (Re) és un nombre adimensional bàsic per a determinar el comportament dels fluids newtonians¹. Rep el seu nom en honor a Osborne Reynolds que el va descriure al 1883. És un dels nombres adimensionals més importants i, juntament amb d'altres, és emprat per proveir un criteri per determinar la semblança fluidodinàmica. La seva fórmula és la que es presenta a continuació, on V és la velocitat del fluid, L la longitud característica del fluid, ρ la densitat del fluid.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

¹ Fluids on la viscositat es pot considerar constant en el temps i depèn únicament de la temperatura. La corba que mostra la relació entre l'esforç o cisalla contra la seva taxa de deformació és lineal.

Valors de Reynolds petits indiquen que el flux és lent i viscos. Valors de Re moderats ($Re \leq 2000$) corresponen a un flux laminar.

D'altra banda, valors de Re alts ($Re \geq 4000$) indiquen fluxos turbulents, els quals es caracteritzen per fortes fluctuacions aleatòries que poden arribar a ser d'alta freqüència.

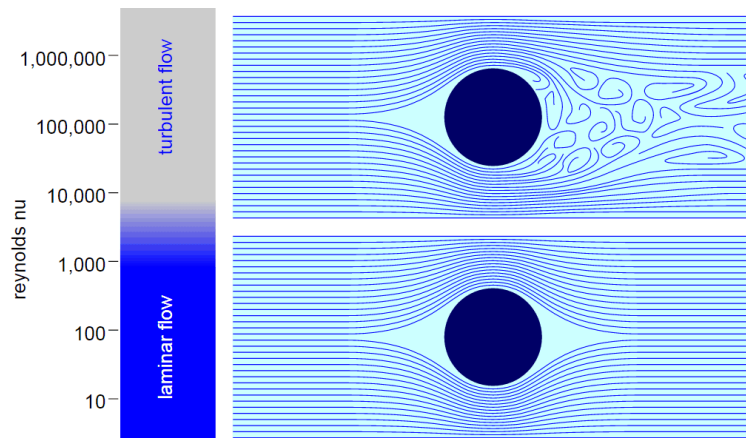


Figura 13. Flux turbulent i flux laminar. -Font: Recuperat de www.reactor-physics.com.

2.3.1.2. Viscositat

Propietat dels fluids la qual es pot considerar com a la resistència d'un fluid al fluir per una geometria. Es pot distingir entre la viscositat dinàmica i la viscositat cinemàtica. La viscositat dinàmica determina la deformació que pateix el fluid quan se li aplica un esforç tallant per unitat de superfície. L'equació (2) indica la relació entre l'esforç tallant, el gradient de velocitats i la viscositat dinàmica (μ), pels fluids newtonians.

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2)$$

La viscositat cinemàtica relaciona la viscositat dinàmica amb la densitat del fluid. La unitat de mesura en el sistema SI és el m^2/s , i en el sistema CGS, el stokes.

Per raons pràctiques, habitualment en els líquids es consideren viscositats cinemàtiques, i en els gasos les dinàmiques (fórmula de Sutherland¹).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

2.3.2. Despreniment de la capa límit

En general, quan un fluid flueix sobre una superfície estacionària, per exemple, una placa plana, el fluid que toca la superfície es deté per l'esforç tallant a la paret. La regió en la qual el flux passa des de la velocitat zero a la paret fins al màxim de velocitat en la part més llunyana a la paret, es denomina **capa límit** (*boundary layer*). S'identifica un gradient positiu de velocitats entre les capes del fluid i el sòlid amb el què està en contacte (veure Figura 14). El concepte de capa límit és important en totes les dinàmiques de fluids viscosos i també en la teoria de la transferència de calor.

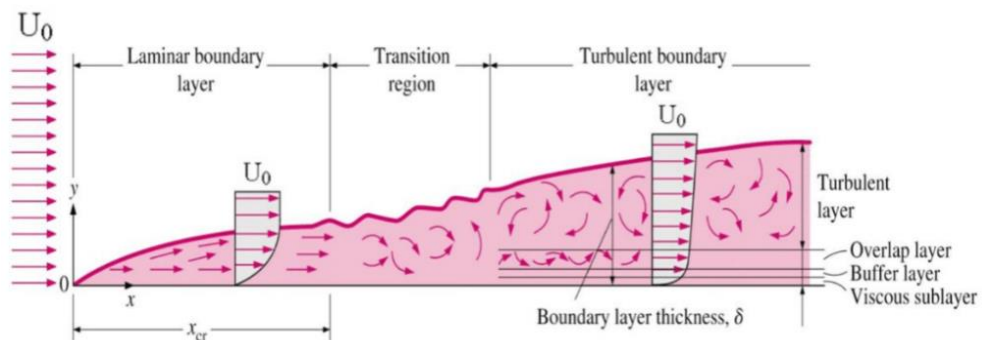


Figura 14. Desenvolupament de la capa límit sobre una placa plana. -Font: Recuperat de www.nuclear-power.net.com.

¹ La llei de Sutherland descriu la dependència de la viscositat dels gasos amb la temperatura, on μ és la viscositat dinàmica, μ_0 la viscositat de referència, C_s la constant de Sutherland (K) i T temperatures en (K) .

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C_s}{T + C_s} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Segons la seva estructura, el context del fluid i el nombre de Reynolds, es poden identificar dues zones rellevants a l'hora de desenvolupar-se la capa límit:

- **Capa límit laminar** (*Laminar boundary layer*): És la zona on el flux és ordenat i, en aquesta capa les forces viscoses juguen un paper molt important.
- **Capa límit turbulenta** (*Turbulent boundary layer*): Passada la zona de transició, s'origina la capa límit turbulenta, on predominen els efectes turbulents i el paper de les forces viscoses ja no és tan rellevant.

Com es pot apreciar a la Figura 14, quan el fluid flueix per una placa plana, es poden identificar quatre regions diferenciades dins la capa límit turbulenta:

- **Subcapa viscosa** (*Viscous sublayer*): Capa on el flux és pràcticament laminar. És la més propera a la capa sòlida.
- **Capa neutral** (*Buffer layer*): Capa de transició, localitzada entre la subcapa viscosa i la regió de coexistència.
- **Capa de coexistència** (*Overlap layer*): Zona on coexisteixen fluxos turbulents i laminars. Capa bastant llunyana a la capa sòlida.
- **Capa turbulenta** (*Turbulent layer*): Zona on el flux turbulent està totalment desenvolupat. Capa més distant de la sòlida.

Es defineix el gruix de la capa límit com la distància des de la paret fins al punt on la velocitat és màxima, on hi ha el “flux lliure”. Per a capes límit on el flux és laminar sobre una placa plana, la solució de Blasius ens proporciona l'equació (4) i (5) per determinar el seu gruix, on Re_x és el nombre de Reynolds basat a la longitud de la placa:

$$\delta \approx \frac{5}{\sqrt{Re_x}} \cdot x \quad (4)$$

Per fluxos turbulents, l'espessor de la capa límit ve donat per:

$$\delta \approx \frac{0,37}{Re_x^{1/5}} \cdot x \quad (5)$$

2.3.3. Coeficient de Drag i Lift

Com a conseqüència del fenomen turbulent, la distribució de la pressió als àleps d'una turbina va fluctuant periòdicament, generant un variació constant de la força a cada àlep a cada instant de temps. Aquesta força es pot dividir entre la component perpendicular al flux, coneguda com a força de sustentació F_L (*Lift force*) i la component paral·lela al flux, anomenada força d'arrossegament o resistència (*Drag force*). Es defineixen els coeficients de les respectives forces de sustentació C_L i d'arrossegament C_D amb les següents expressions:

$$C_L = \frac{F_L(t)}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{F_D(t)}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (7)$$

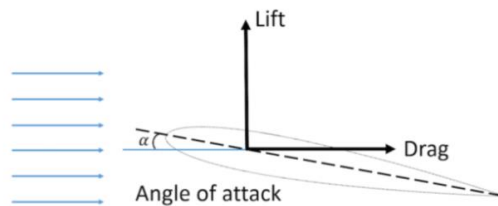


Figura 15. Representació de les forces de Drag i de Lift. -Font: Recuperat de www.comsol.com.

On ρ és la densitat del fluid (kg/m^3), V és la velocitat del flux (m/s) i A és l'àrea de la superfície perpendicular al flux en (m^2).

2.3.4. Equacions fonamentals

Un volum de control és una abstracció matemàtica la qual consisteix en una regió de l'espai aïllada sobre la qual s'apliquen lleis i models matemàtics per a sotmetre'l a estudi. D'aquesta manera, un sistema complex pot ser convertit en un conjunt format per volums de control i ser analitzat aplicant lleis bàsiques a regions de l'espai concretes en comptes de masses.

Aquesta conversió s'aconsegueix gràcies al teorema del transport de Reynolds. Per a un volum de control deformable, el teorema de transport és:

$$\frac{d}{dt} \cdot (B_{sist}) = \frac{d}{dt} \cdot \left(\int_{vc} \beta \cdot \rho \cdot dV \right) + \int_{sc} \beta \cdot \rho \cdot (V_r \cdot n) \cdot dA \quad (8)$$

Aplicant el teorema de transport a la massa, a la quantitat de moviment, al moment cinètic i a la energia en un volum de control infinitesimal, s'obtenen les relacions diferencials que són molt importants en la dinàmica dels fluids. A continuació es procedeix a mostrar les relacions que s'obtenen per un flux laminar.

2.3.4.1. Conservació de la quantitat de moviment

Per poder predir el comportament d'un sistema fluidomecànic s'empren les anomenades equacions de moviment. La quantitat de moviment o moviment lineal d'un cos és el producte de la seva massa per la velocitat a la qual es desplaça ($P = m \cdot V$). Aquesta expressió té origen a la segona llei de Newton. Tot seguit, al aplicar l'expressió de la quantitat de moviment a l'equació del teorema del transport de Reynolds la variable $B = m \cdot V$ i $\beta = \frac{dB}{dm} = V$, per tant, per un volum deformable, l'equació de la quantitat de moviment seria la següent:

$$\frac{d}{dt} \cdot (m \cdot V) = \sum F = \frac{d}{dt} \cdot \left(\int_{vc} V \cdot \rho \cdot dV \right) + \int_{sc} V \cdot \rho \cdot (V_r \cdot n) \cdot dA \quad (9)$$

Si es tracta amb un flux unidimensional que presenta un nombre finit d'entrades i sortides, l'expressió del teorema de transport de Reynolds adopta la següent forma:

$$\sum \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \cdot \left(\int_{vc} \mathbf{V} \cdot \rho \cdot dV \right) + \left(\left(\sum_{sortides} \dot{m} \cdot \mathbf{V}_s \right) - \left(\sum_{entrades} \dot{m} \cdot \mathbf{V}_e \right) \right) \quad (10)$$

2.3.4.2. Conservació de la massa

En el teorema de transport de Reynolds, hi ha una relació directa entre les variacions temporals, són les integrals de volum i les de la superfície de control. Però, les derivades parcials de les propietats del sistema estan resoltes per les lleis bàsiques de la mecànica de fluids. Per tant, si a l'equació del transport (8), s'eliminen les derivades temporals s'obtenen les esmentades lleis bàsiques en format d'integral.

A les integrals la variable B representa la massa, la quantitat de moviment, el moment cinètic i l'energia, successivament. Pel que fa al cas de la conservació de la massa, la variable $B=m$ i $\beta = \frac{dm}{dm} = 1$, per tant:

$$\frac{d}{dt} \cdot (m_{sist}) = \frac{d}{dt} \cdot \left(\int_{vc} \rho \cdot dV \right) + \int_{sc} \rho \cdot (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) \cdot dA = 0 \quad (11)$$

D'on es dedueix la forma integral de la conservació de la massa en un volum de control deformable. Per un volum de control fixe tenim:

$$\left(\int_{vc} \frac{d\rho}{dt} \cdot dV \right) + \int_{sc} \rho \cdot (\mathbf{V}_r \cdot \mathbf{n}) \cdot dA = 0 \quad (12)$$

En el cas que el volum de control tingués més d'alguna entrada i sortida, l'equació queda reescrita de la següent forma:

$$\left(\int_{vc} \frac{d\rho}{dt} \cdot dV \right) + \left(\left(\sum_{sortides} \rho_s \cdot A_s \cdot V_s \right) - \left(\sum_{entrades} \rho_e \cdot A_e \cdot V_e \right) \right) = 0 \quad (13)$$

Consecutivament, per fluxos estacionaris i que també contenen diverses entrades i sortides al volum de control, l'equació quedaria simplificada a la expressió següent:

$$\left(\sum_{\text{sortides}} \rho_s \cdot A_s \cdot V_s \right) = \left(\sum_{\text{entrades}} \rho_e \cdot A_e \cdot V_e \right) \quad (14)$$

2.3.4.3. Expressions de Navier-Stokes

Les expressions de Navier-Stokes són un conjunt d'equacions en derivades parcials no lineals de segon ordre que descriuen el moviment d'un fluid viscos. Aquestes equacions governen l'atmosfera terrestre, les corrents oceàniques i el flux al voltant de qualsevol geometria i, en general, qualsevol fenomen que impliqui fluids newtonians. Avui en dia, només es coneixen un número limitat de solucions analítiques d'aquestes equacions.

Les expressions de Navier-Stokes es poden resoldre amb l'ajuda de la simulació computacional (CFD). La solució de les equacions descriuen la velocitat en cada punt del flux respecte cada instant de temps.

$$\begin{aligned} \rho \cdot g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \cdot \frac{du}{dt} \\ \rho \cdot g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \cdot \frac{dv}{dt} \\ \rho \cdot g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \cdot \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

2.3.5. Principi de Bernoulli

El fluid hidràulic en un sistema té energia que prové de tres formes: de l'energia cinètica ocasionada pel pes i la velocitat, de l'energia potencial produïda pel pes i l'altura i en forma de pressió. Aquest principi va ser descobert al segle XVIII per Daniel Bernoulli, científic i metge, nascut a Holanda. Daniel va demostrar que, per a un fluid no viscos, un increment en la velocitat del fluid implica una disminució de la seva pressió o energia potencial; la seva energia es manté constant al llarg del recorregut. És a dir, la suma d'energies potencial, de pressió i cinètica, en els diversos punts del sistema, és constant, si el flux ho és també (16). La velocitat es veu afectada quan el diàmetre varia.

Tot i que Bernoulli va deduir el principi, no va ser fins al 1752 que Leonhard Euler va obtenir la fórmula que coneixem avui en dia.

$$(\rho \cdot g \cdot h_i) + P_i + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^2\right) = \text{Constant} \quad (16)$$

El teorema s'aplica a fluxos sobre superfícies, com les ales d'un avió, àleps de turbomàquines o les hèlixs dels vaixells. Per exemple, les ales estan dissenyades per a que l'aire flueixi amb més velocitat sobre la superfície superior que sobre la inferior, de manera que la pressió sobre aquesta última és més gran que sobre la superior.

Aquesta diferència de pressió proporciona la força de sustentació que manté a els avions en vol.

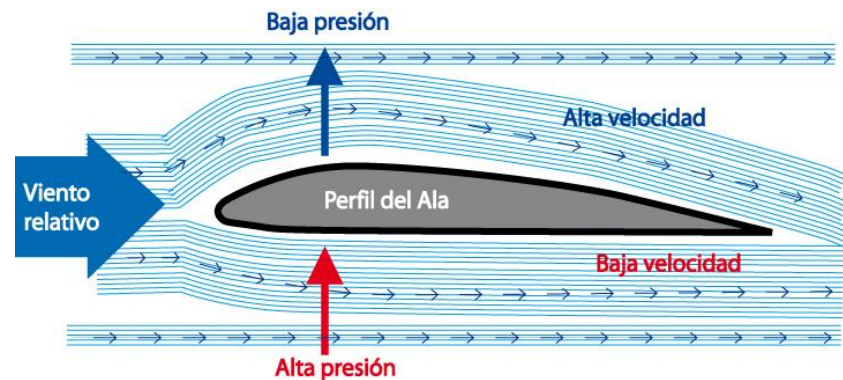


Figura 16. Principi de Bernoulli. -Font: Recuperat de www.experimentoscientificos.es.

2.4. CFD

2.4.1. Què és el CFD

Computacional Fluid Dynamics o CFD és l'anàlisi de sistemes que es basen en fluxos de fluids, transferència de calor i fenòmens associats com les reaccions químiques per mitjà de les simulacions computacionals. Algunes aplicacions típiques podrien ser els equips de barreja dins l'enginyeria química o l'emmotllament de polímers, entre d'altres. Pel que fa a l'edificació, el CFD s'usa en l'estudi ambiental d'edificis (càrregues de vent i neu, climatització, etc.), així com en diverses aplicacions relacionades amb la investigació dels efectes del foc i el fum (en túnels per exemple).

A la indústria del motor, s'aplica el CFD a la modelització de la combustió i l'aerodinàmica dels vehicles. En l'enginyeria elèctrica i electrònica, el trobem a la refrigeració de circuits i microcircuits.

Altres aplicacions bastant rellevants serien en el camp de la medicina, on s'aplica CFD a l'estudi del flux sanguini a través dels capil·lars, artèries o venes.

A l'indústria aeroespacial va integrar els anàlisis en CFD al disseny dels motors. Així mateix, els fabricants d'automòbils, necessiten poder predir i simular les forces degudes a la resistència de l'aire, el comportament dels fluxos d'aire que es donen a la part inferior del vehicle o a l'interior del mateix. És per això que l'ús de la simulació computacional resulta ser un pas primordial en els dissenys dels productes i dels processos industrials.

L'objectiu principal del CFD és proporcionar una capacitat de càlcul comparable a la d'un CAE¹ (*Computer-Aided Engineering*). El motiu pel qual el CFD s'ha imposat àmpliament en el sector industrial és degut a que l'hora de descriure o predir fluxos de fluids resulta francament útil i eficient.

2.4.2. Com funciona el CFD

El CFD va tenir origen a partir de la combinació de dues disciplines: la mecànica de fluids i el càlcul numèric. Les equacions que regeixen el flux tenen origen en la mecànica de fluids i poden ser resoltes per mitjà de diferents mètodes numèrics. La principal equació resolta via fluidodinàmica computacional és l'equació de transport de Reynolds juntament amb les expressions de Navier-Stokes, esmentades anteriorment.

Totes les equacions de conservació resoltes en la dinàmica de fluids computacional posseeixen la forma de l'equació del teorema del transport de Reynolds.

¹ Eina molt potent orientada al desenvolupament i perfeccionament de productes. Amb ajuda d'un computador molt potent, els professionals poden realitzar diferents anàlisis com: anàlisis estàtics, dinàmics, de fluids, tèrmics, electromagnètics i acústics. Requereix d'una potència de càlcul molt considerable.

Tot i que les fórmules són àmpliament utilitzades per aplicacions de CFD, es pot afirmar que fins al moment no hi ha solució analítica de les equacions. Per aquest motiu, cal resoldre-les per mitjà d'algun mètode de discretització.

En aquests mètodes s'intercanvia el domini continu per un domini discret, el que significa que un conjunt de volums de control són utilitzats per representar el domini original.

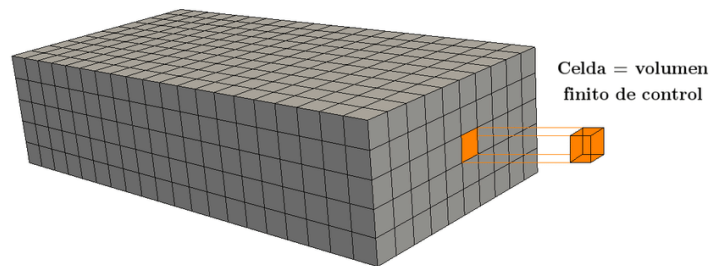


Figura 17. Domini discretitzat en petits volums de control. -Font: Recuperat de www.simulacionesyproyectos.com.

Les equacions citades anteriorment són resoltes per cada un dels volums de control, generant un sistema d'equacions que han de ser resoltes numèricament amb el suport de softwares de fluidodinàmica computacional, els quals posseeixen la capacitat per solucionar-les ràpidament i amb precisió.

Tots els codis de CFD contenen tres parts principals: el pre-procés, el calculador i el post-procés. Tot seguit s'examinarà breument la funció de cada un d'aquestes parts dins del context d'un codi de CFD.

- **Pre-procés**

El pre-procés consisteix la introducció de les dades inicials sobre les quals es realitzaran els posteriors càlculs. Les activitats en el pre-procés consisteixen en:

1. Definició de la geometria o regió d'interès d'estudi: establir el domini computacional
2. Generació de la malla (divisió del domini computacional en petits subdominis)
3. Selecció del fenomen físic i químic que necessita ser modelat
4. Definició de les propietats del fluid de treball
5. Especificació apropiada de les condicions de contorns en aquelles cel·les que ho requereixen

- **Calculador**

La funció del calculador és donar una solució al problema plantejat, mitjançant iteracions numèriques i els paràmetres introduïts en el pre-procés. Els mètodes de càlcul que usen els calculadors són: el mètode de les diferències finites, el mètode dels elements finits i el mètode dels volums finits. El mètode més utilitzat en el càlcul de CFD és el mètode de volums finits, el qual s'utilitza en el present treball.

Aquest, discretitza les equacions de conservació de massa, quantitat de moviment i energia en cadascuna de les formes geomètriques del domini computacional.

A més a més, ofereix més opcions que els altres mètodes esmentats, ja que pot implementar-se tan en malles estructurades com en malles no estructurades, entenent com a malles estructurades aquelles que tota la discretització segueix un patró reticular.

- **Post-procés**

Un cop ja es té tot calculat, és essencial que el software tingui unes bones capacitats gràfiques per tal de millorar la interpretació dels resultats obtinguts a la simulació. És per això, que els principals softwares de CFD, estan equipats amb eines de visualització de dades molt interessants. Acostumen a incloure:

- Visualització de la geometria i la malla
- Gràfics de vectors
- Gràfics de contorns
- Representacions gràfiques en 2D i 3D
- Rastreig de partícules
- Manipulació de la vista (translació, rotació, escalat, etc.)
- Visualització en color
- Animacions de moviment

Les eines de visualització resulten molt útils a l'hora d'interpretar els resultats d'una forma més gràfica i personalitzada a les necessitats de cada cas.

2.4.3. Models de turbulència

Pels fluxos laminars, les equacions de Navier-Stokes es poden resoldre sense gaire complicació. Però la realitat és que els fluxos, en general, no acostumen a ser laminars, sinó que són turbulents. En aquest cas, les equacions de Navier-Stokes no es poden resoldre de manera directa. Per aquest motiu, s'han desenvolupat models turbulents coneguts com RANS, que usen les equacions de Navier-Stokes de manera que les petites escales de fluctuacions de turbulència no siguin simulades directament. Aquests mètodes introdueixen variables addicionals a les equacions amb l'objectiu de resoldre o conèixer les incògnites que queden sense solució i, reduir així, els esforços computacionals. Alguns d'aquests models serien *K- ϵ* , *K- ω* , *Spalart-Allmaras*, *Shear Stress Transport*, entre d'altres.

Al present projecte s'ha emprat el SST *k- ω* (*Shear Stress Transport k- ω*). Això és degut a que aquest model permet utilitzar la formulació robusta i precisa del model *K- ω* a la regió més a prop de la paret juntament amb l'eficàcia del model *K- ϵ* a les zones més exteriors, on és desenvolupat el flux lliure. Gràcies a tot això, s'obté més versatilitat a l'hora d'estudiar una gamma més àmplia de fluxos que els models estàndards *K- ϵ* i *K- ω* per separat.

2.4.4. Fonts d'error en la simulació numèrica de turbomàquines

Els errors de càlcul en CFD són, en gran mesura, responsables de la desviació dels resultats numèrics respecte dels valors experimentals. Per tant, resulta legítim i necessari fer una comparació d'ambdós resultats, i estimar pels primers, uns intervals de confiança. L'habitual absència dels intervals de confiança en els valors numèrics, és degut al grau de complicació que exigeix estimar-los, ja que existeixen molts factors que poden arribar a falsejar els resultats. Per tal d'estimar els intervals de confiança dels resultats numèrics, resulta rellevant conèixer totes les fonts d'error i la seva importància relativa a cada cas.

2.4.4.1. Fonts d'error en els càlculs CFD

A l'hora de discutir sobre els errors i els dubtes de les eines de la simulació en CFD, així com la seva estimació, es requereix d'una nomenclatura unificada. És per això, que en aquest projecte s'adopten les definicions proporcionades per Roache, P. J. (1998) al llibre "*Verification and Validation in Computational Science and Engineering*".

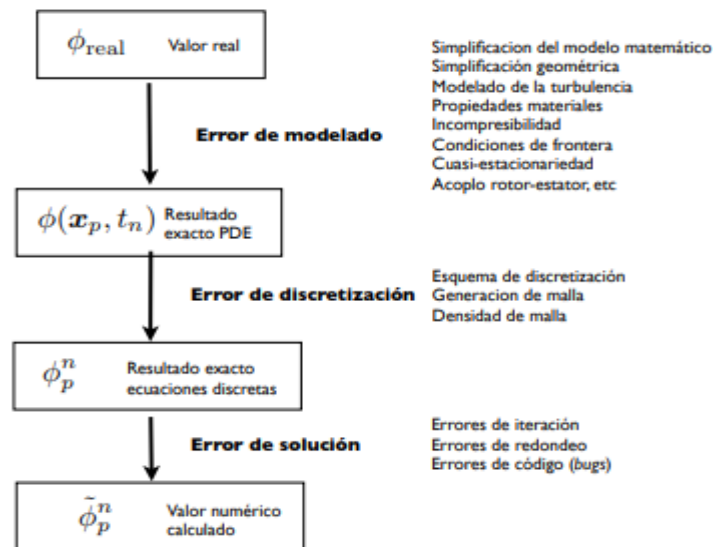


Figura 18. Fonts d'error i divisió d'una tasca a CFD. -Font: Laín Beatove, Santiago. (2006). *Simulación numérica en turbina Francis*.

Error: L'error total és la diferencia entre el valor obtingut mitjançant una simulació i el del flux real; aquest es subdivideix en error de modelat i error numèric. A la vegada l'error numèric es divideix en l'error de discretització i l'error de solució.

Verificació: Procés d'estimació dels dubtes numèrics.

Validació: Procés d'estimació dels dubtes del modelat. Tot i això, des de un punt de vista tècnic, és pràcticament impossible estimar els respectius errors per separat. Les fonts d'error que repercuten als resultats d'una simulació apareixen a la Figura 18, seguint un ordre cronològic.

Error de modelatge: L'error de modelatge és la diferencia entre el valor real (ϕ_{real}) i la solució concreta $\phi(x_p, t_n)$ de les equacions diferencials que descriuen el comportament del flux. Aquest error sorgeix del ús de mètodes numèrics, i ve parcialment influenciat per l'usuari. Acostuma a tenir simplificacions i suposicions referides a la construcció matemàtica del model, per exemple:

- Establiment dels límits geomètrics del domini del càlcul i les condicions de frontera.
- Hipòtesis referents a les propietats dels materials que ho conformen.
- Elecció de les equacions que representen la turbulència.
- Consideració dels processos no estacionaris.

Aquestes fonts d'error rarament estan quantificades, i únicament poden minimitzar-se a través de l'experiència de l'usuari en casos semblants.

Error numèric: És la diferència entre les solucions de les equacions diferencials $\phi(x_p, t_n)$, en el punt X_p i a l' instant de temps t_n . La solució del sistema lineal discret φ_p^n es coneix com error de discretització. Aquest error ve de que les equacions discretes són, tan sols, una aproximació de les equacions diferencials. Degut a l'ús dels mètodes iteratius, la solució exacta de les equacions discretes no és el resultat real del càlcul numèric. La diferència entre φ_p^n i la solució calculada de φ_p^n és coneix amb el nom d'error de solució, per tant, la suma dels errors de solució i discretització són l'error numèric. Els errors de solució poden ser originats per:

- Interrupció de la solució iterativa (criteri de convergència).
- Errors d'aproximació deguts a la representació finita dels números a l'ordinador.
- Errors en el codi

2.4.4.2. Errors de modelatge a les turbomàquines

A l'hora de validar els càlculs en CFD de turbomàquines, segons les definicions donades al paràgraf anterior, és necessari comprendre la influència de l'estimació que causen errors al modelatge. Per exemple, la geometria exacta d'algunes peces les quals poden arribar a ser realment complexes com el rotor, els àleps directrius o la carcassa espiral és, amb freqüència, simplificada.

A les màquines hidràuliques, l'error comès al fixar les constants dels materials, és pràcticament menyspreable, ja que la densitat i la viscositat dinàmica de l'aigua compleixen aquesta condició. No obstant, és conegut que en bombes, com a les turbines hidràuliques, existeix un petit gradient de temperatures, degut a les pèrdues en el flux, però aquest és tan mínim que pràcticament no es té en compte a l'equació d'entalpia.

L'elecció de les condicions de contorn del problema juga un paper clau en tota simulació numèrica. De fet, és obligatori imposar unes condicions d'entrada físicament correctes. De fet, a les turbomàquines hidràuliques la condició de contorn referida a la pressió de la sortida s'acostuma a suposar constant per tal de simplificar càlculs, però això no sempre és cert a les màquines reals. Per això, resulta necessari definir de manera encertada i conscient aquestes condicions de contorn per tal d'evitar aquets petits errors de modelatge.

2.5. Fenòmens a l'interior d'una turbina Francis

Durant el procés de generació elèctrica a les turbines Francis, apareixen fenòmens dinàmics no estacionaris que es van propagant per tots els components de la màquina. Un d'ells és el fenomen de la interacció rotor-estator, considerat com un dels més rellevants, ja que genera vibracions, inestabilitats i fisures. Respecte la interacció rotor-estator hi ha molt escrit en referència a l'estudi d'aquest fenomen en turbines Francis, un exemple són els articles de Zobeiri, Kueny, Farhat et al. (2006), Gagnon, Payette y Deschenes (2007), els quals aporten una perspectiva bastant completa sobre la rellevància d'aquest fenomen.

2.5.1. Interacció rotor-estator (RSI)

El fenomen rotor-estator, o conegut també com RSI, es desenvolupa entre els àleps directrius i els àleps del rodet. És produït per la interacció potencial entre els elements estacionaris i els rotatoris, els efectes viscosos i la interacció de l'estructura amb les ones de xoc generades pel fluid. La interacció de flux potencial té lloc quan un àlep del rodet coincideix amb un àlep directriu i, juntament amb la velocitat del rodet, provoca en aquest instant un pic de pressió. Aquest fenomen provoca soroll i vibracions que, com a conseqüència, donen lloc a nivells elevats de fatiga en els materials de la màquina i, inevitablement, una reducció en el rendiment.

El RSI es reflexa físicament amb les fluctuacions de pressió a llarg de tots els components. Donat que el fluid, en travessar l'espai radial entre els àleps directrius i del rodet, és transversalment no uniforme, la pressió estàtica i la velocitat (associada a l'angle d'incidència) varien. Cal mencionar que té un caràcter i comportament no estacionari.

En els casos de menor separació entre rotor i estator, la magnitud d'aquestes fluctuacions poden resultar majors que la diferència total de pressió a la màquina. A la Figura 19 que trobem a continuació veiem l'efecte de la variació de pressions ocasionades per la interacció del flux potencial (*potential interaction*).

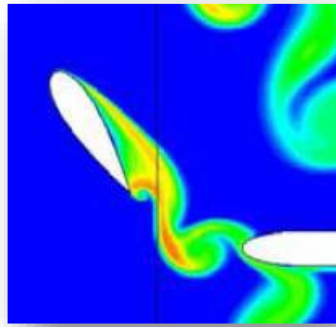


Figura 19. Interacció RSI. -Font: Recuperat de www.mcgill.com.

D'altra banda, existeix la interacció d'excitació (wake interaction) o del deixant (veure Figura 20), la qual és conseqüència del desprendiment de capa límit al sortir dels àleps directrius o del rodet, provocant la generació de vòrtex a una freqüència concreta. Una manera d'estudiar el fenomen rotor-estator propi d'aquestes màquines, és a través de les transformades ràpides de Fourier (FTT) de senyals temporals, aplicades a la senyal de les fluctuacions de pressió a qualsevol dels punts, obtenint de tal manera, les seves freqüències. Aquest és el mètode emprat en el present projecte.

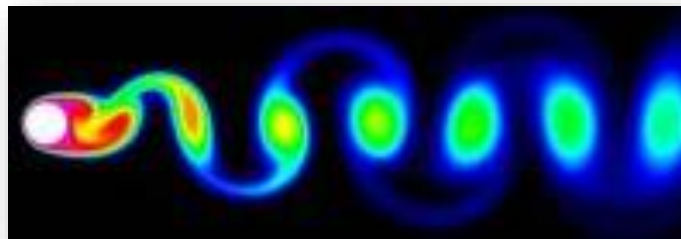


Figura 20. Interacció del deixant. -Font: Recuperat de www.mcgill.com.

L'estudi de la interacció d'excitació o deixant és un estudi més complex degut a que no es poden calcular de manera teòrica les seves freqüències. Aquest fenomen únicament es pot estudiar de manera experimental utilitzant sensors a les sortides dels àleps.

A l'interior d'una turbina Francis, poden succeir alguns altres fenòmens relacionats amb els modes de fallida o modes anòmals de funcionament. S'entén com ha mode de fallida aquell estat en el que la turbomàquina no funciona correctament.

Alguns d'aquets modes són els següents:

- **Cavitació:** implosió de bombolles a les superfícies sòlides de la màquina.
- **Erosió per partícules sòlides:** Fregament degut a partícules per l'interior de la turbina.

2.5.2. Cavitació

La cavitació, després de la interacció RSI, és un dels majors factors de risc a l'hora de tenir en compte si es vol aconseguir el bon funcionament de la turbomàquina.

La formació de cavitació i les seves conseqüències són funció de molts factors, tals com el propi disseny, dimensions de la turbina, velocitat específica i el punt de funcionament, entre d'altres. La cavitació es defineix com la formació de bombolles (cavitats) en líquids.

Aquestes bombolles s'originen quan la pressió del líquid baixa per sota de la pressió del vapor. És a dir, la cavitació es dona quan es produeix un descens local de la pressió per sota de la pressió de saturació del líquid, el qual provoca l'ebullició del líquid a temperatura ambient comportant la formació de vapor o gas.

Aquestes bombolles, viatgen a zones de major pressió on implosionen, de tal manera que el vapor passa a estat líquid de forma instantània produint una estela de gas juntament amb un ràpid desgast de les superfícies. Aquesta implosió causa ones de pressió que viatgen pel fluid. Aquestes poden dissipar-se per la corrent del fluid o poden col·lidir amb alguna superfície. Si les superfícies on col·lideixen és la mateixa repetidament, el material tendeix a debilitar-se i s'erosiona.

Aquesta erosió provoca danys a les superfícies però, a més a més, aquestes es converteixen en una zona de major pèrdua de pressió i, per tant, es converteixen en un focus de formació de futures bombolles de vapor.

Els danys a les superfícies poden arribar a ser notables, ja que quan les bombolles implosionen, les forces exercides pel fluid en esclafar les cavitats deixades pel vapor, donen lloc a pressions localitzades molt altes, produint picadures i destrosses sobre tals superfícies (veure Figura 21).



Figura 21. Danys produïts per la cavitació. -Font: Recuperat de www.ingenieromarinero.com.

Les fases de la cavitació es divideixen en dos:

- La primera es caracteritza per l'aparició i el creixement de les cavitats plenes de vapor a l'interior del líquid que són arrossegades per la corrent. La velocitat de creixement de les bombolles o cavitats és funció de diversos paràmetres, com per exemple el radi inicial de la cavitat, la pressió exterior, etc.
- La segona fase consisteix en el col·lapse, ja que la pressió exterior de la cavitat és superior a la pressió del vapor i, per tant, les bombolles col·lapsen violentament, condensant-se pràcticament al instant, impactant la superfície sòlida amb valors instantanis de 500 atm de pressió degut a les ones de xoc. Aquest col·lapse s'efectua en nanosegons. La intensitat de la implosió és funció de la dimensió de la bombolla i del gradient local de pressió. A la Figura 22 trobem les possibles formes de col·lapse de les bombolles en un medi infinit i a prop d'una paret.

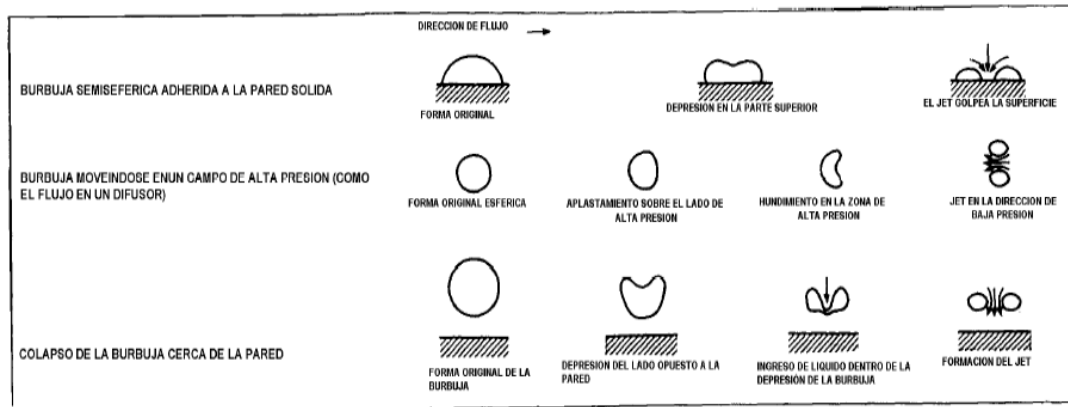


Figura 22. Diferents formes de col·lapse. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). Detección de cavitación en turbina Francis.

Pel que fa a la classificació d'aquest fenomen, hi ha nombroses possibilitats de fer-ho, segons la forma en que es produeix, segons el seu grau de desenvolupament, etc. Una classificació més descriptiva i operativa, ja que fa referència directa a la forma en que empíricament s'ha observat que succeeix, és la que es depèn del coeficient de Thoma (σ), el qual es defineix com:

$$\sigma = \frac{(H_a - h_s - h_v)}{H} \quad (17)$$

On H_a és l'altura baromètrica, h_s l'altura d'aspiració, h_v l'altura de vapor i H el salt net.

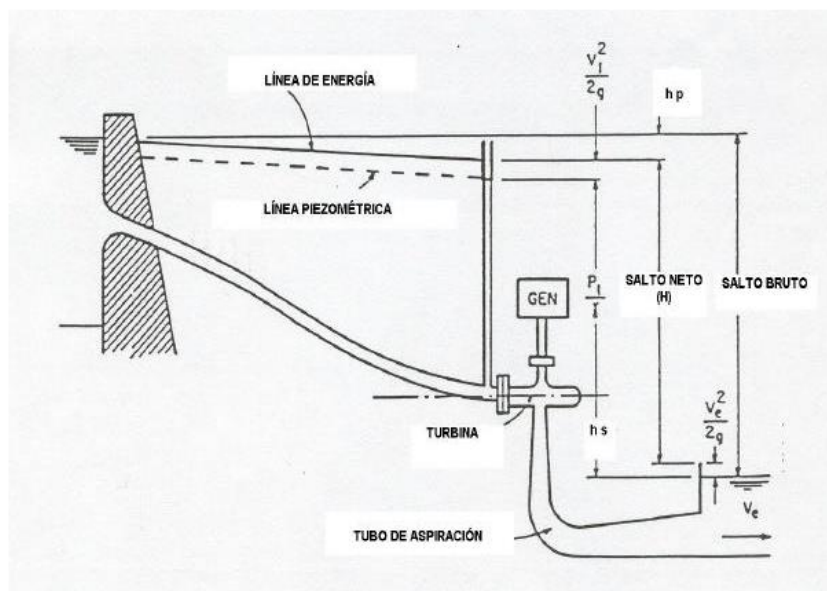


Figura 23. Esquema d'una instal·lació hidroelèctrica.

-Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). Detección de cavitación en turbina Francis.

Aquest coeficient es pot determinar experimentalment als bancs d'assajos dels laboratoris, emprant models a escala reduïda de les turbines en qüestió. En funció de la dependència o no del coeficient de Thoma, la cavitació originada a les turbines hidràuliques es pot classificar en diferents tipus.

Cavitació que depèn de σ :

- **Cavitació de bombolles:** Cavitació que acostuma a parèixer al final dels àleps, cap a la sortida del rodet i es veu influenciat pel punt de funcionament de la turbomàquina.

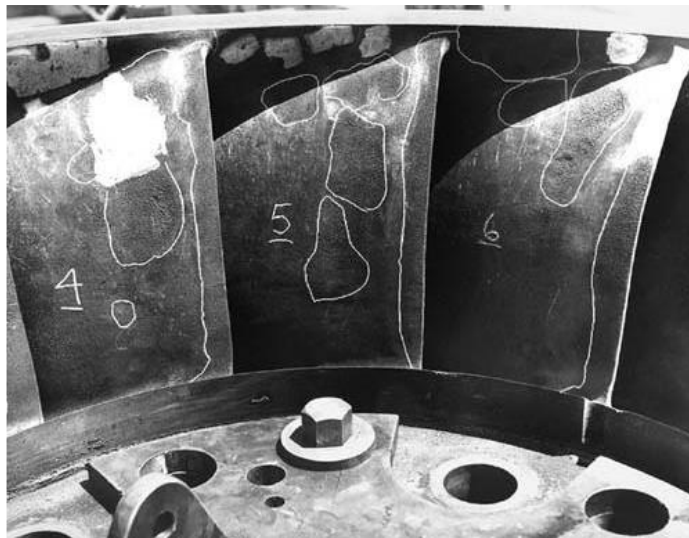


Figura 24. Efecte de l'erosió de la cavitació de bombolles. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). Detección de cavitación en turbina Francis.

- **Cavitació a la sortida del àlep (outlet cavitation):** Cavitació on la implosió de les bombolles es localitza a la cara de succió dels àleps.

Cavitació que no depèn de σ :

- **Cavitació a l'entrada del rotor a la cara de succió (leading edge cavitation):** Cavitació que produeix erosions profundes en un curt període d'exposició, ja que és el tipus de cavitació que majors danys causa en turbines hidràuliques. S'acostuma a donar quan la turbina treballa amb salts majors dels que està dissenyada.
- **Cavitació a l'entrada del rotor a la cara de pressió (Intrados inlet cavitation):** Anàloga a la del paràgraf anterior però resulta de treballar amb salts menors als de disseny.
- **Cavitació produïda per vòrtexs a carga parcial (Part-load vortices):** És generada per les característiques del flux que circula pels canals del rodet quan es treballa amb càrregues molt

baixes. Es caracteritza per l'aparició de remolins cavitants paral·lels que indueixen a una dispersió del flux pels canals del rodet. Cal mencionar que el perill d'erosió és baix i produeix soroll, però aquest és menor que a les cavitacions mencionades anteriorment.

D'altra banda, existeixen altres classificacions que determinen el tipus de cavitació:

- **Cavitació de torxa:** Cavitació on apareix un vòrtex que rep el nom de torxa i es dona al tub d'aspiració. Apareix quan es treballa amb càrregues parcials o sobrecàrregues. Aquesta torxa produeix oscil·lacions de pressions que poden traduir-se en fluctuacions no desitjades al parell de l'eix de la turbina, juntament amb un notable nivell de vibracions.

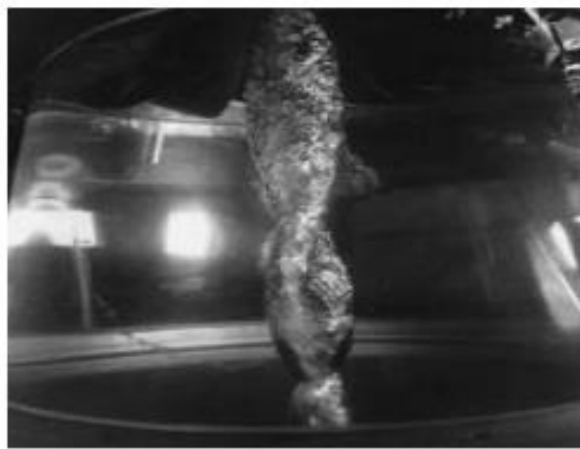


Figura 25. Torxa observada al tub d'aspiració en un banc de proves. -Font: Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). *Detección de cavitación en turbina Francis.*

- **Cavitació per desprendiment de vòrtex de Von Karman (vortex shedding cavitation):** És localitzada a partir del final de la sortida dels àleps.
- **Cavitació a les juntes (gap cavitation):** S'origina un flux a alta velocitat com a resultat del contacte entre dues zones que estan a diferent pressió.
- **Cavitació al estator o àleps directrius:** Es pot donar el cas que quan el perfil dels àleps del distribuïdor no estan adaptats a les condicions hidrodinàmiques del punt de treball, aparegui cavitació.

Aquest projecte parteix de la base que els danys que presenta el rotor d'estudi han estat produïts per la cavitació de bombolles, la qual ve influenciada pel punt de funcionament de la màquina.

2.5.3. Erosió per partícules sòlides

A més a més de l'erosió per cavitació, es pot produir l'erosió per partícules sòlides o sediments que arrossega el fluid, provocant danys al rotor de la turbina. L'origen d'aquets sediments és degut a les partícules de sorra i petites pedres a les ribes de les preses on es troben les turbines. Aquestes partícules, un cop són introduïdes al flux de la turbina, posseeixen una energia cinètica alta. El grau de dany ocasionat per les col·lisions partícula-paret ve determinat en funció dels següents paràmetres:

- Propietats de les partícules (geometria, duresa, etc.)
- Propietats dels components (dureses, elasticitat, propietats dels materials emprats, etc.)
- Característiques del flux (velocitat, angle d'impacte, etc.)
- Forces a les partícules (força centrífuga, flotació, força turbulenta, etc.)

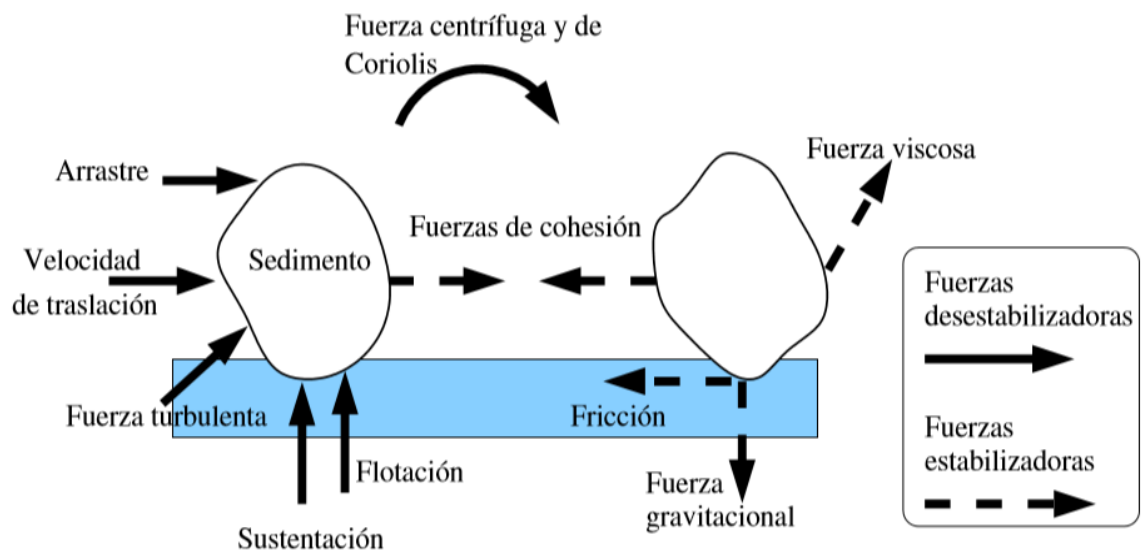


Figura 26. Forces que actuen sobre les partícules en un camp fluid.

-Font: Thapa, B., *Sand Erosion in Hydraulic Machinery*, (2004).

Donat que l'erosió per partícules afecta de manera directa al funcionament i operativitat d'una turbina hidràulica, conèixer els mecanismes d'erosió és una tasca obligada, tant pels operadors com pels dissenyadors. Els mecanismes d'erosió que poden donar-se en una superfície sòlida són:

- Tall per abrasió
- Fatiga superficial
- Deformació plàstica
- Fractura fràgil

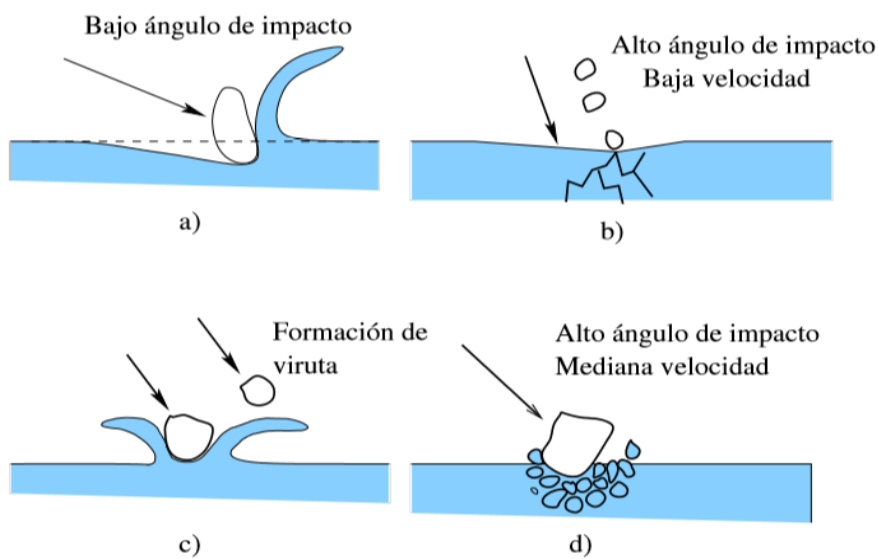


Figura 27. Mecanismes d'erosió. a) Tall per abrasió; b) Fatiga superficial; c) Deformació plàstica; d) Fractura fràgil.

-Font: Thapa, B., Sand Erosion in Hydraulic Machinery, (2004).

3. Desenvolupament del projecte

A continuació es procedeix a detallar la metodologia que es seguirà per l'elaboració del present treball, i les seves respectives fases.

3.1. FASE 1. Definició de l'objecte d'estudi

En primer lloc, es procedeix a definir l'objecte d'estudi. Aquest, és constituït per les geometries de l'estator, el rotor i el tub d'aspiració. Cal indicar però, que el rodet és la part fonamental de l'estudi, a partir del qual s'analitzaran diferents variants que poden afectar al comportament del conjunt. Un punt important a comentar, és que les geometries de les quals es parteix per realitzar l'estudi, són en realitat el negatiu de les originals, és a dir, consisteixen en la geometria que adopta el fluid al passar a través de les diferents parts de la turbina. Per tal de poder treballar amb l'Ansys CFX cal partir d'aquesta base, ja que sinó, les simulacions obtingudes estarien referides als sòlids de la turbina i no al comportament del fluid.

Estator

La geometria de l'estator es presenta amb algunes simplificacions, ja que l'estudi es realitza sense la voluta. El fluid entra per la cara exterior de l'estator (circumferència major), flueix per l'interior dels 32 àleps directrius, 16 àleps fixes (*guide vanes*) i 16 de mòbils (*wicked gates*). Finalment, surt per la cara interior de l'estator (circumferència menor).

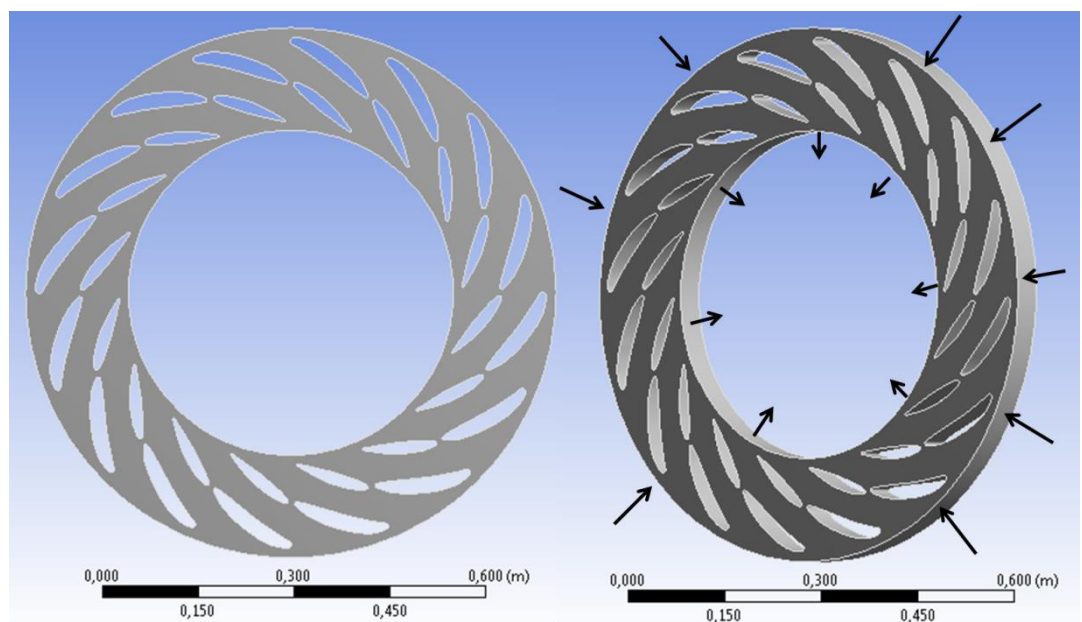


Figura 28. Geometria de l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Rotor

És la part principal de l'estudi. És la peça que transforma l'energia del fluid a energia mecànica. L'entrada del fluid es produeix per la cara exterior del rotor (circumferència major) i la sortida per la circumferència menor. Es compon de 7 àleps que condueixen el fluid cap a al tub d'aspiració.

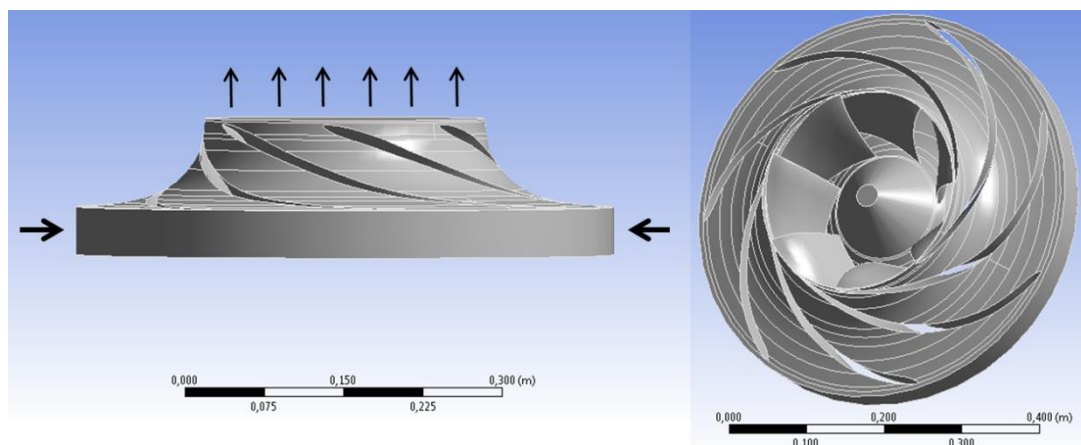


Figura 29. Geometria del rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Tub d'aspiració

Tub pel qual és evacuat el fluid al sortir del rotor. Com es pot apreciar, la seva secció varia al llarg de la seva longitud. D'aquesta manera, el fluid surt del rotor a gran velocitat i pressió i, conforme va avançant pel tub, va disminuint la seva pressió i velocitat gràcies a aquest augment de secció, la qual fa que el tub d'aspiració actuï com un difusor. A la sortida del tub d'aspiració hi ha pressió atmosfèrica.

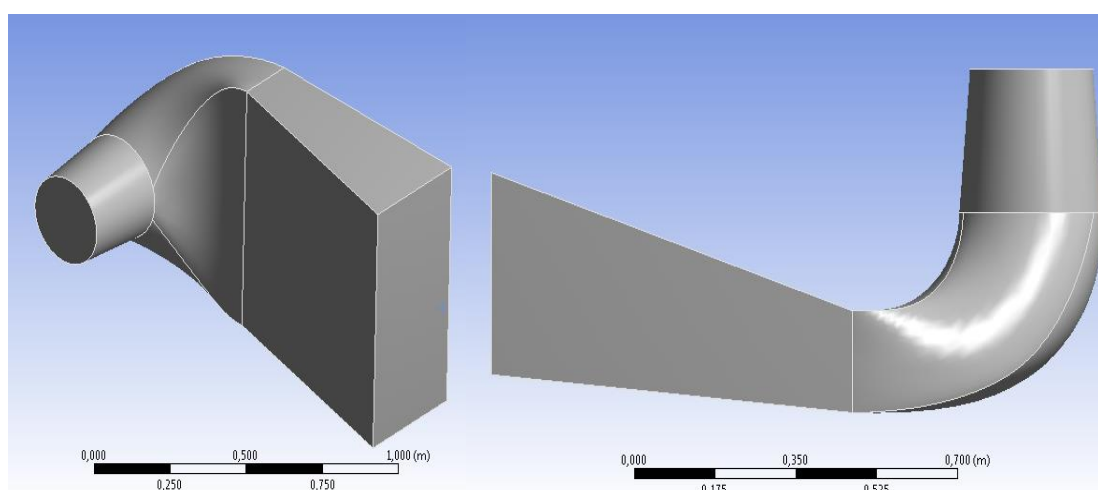


Figura 30. Geometria del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Conjunt

El conjunt de sòlids que conforma l'objecte d'estudi es mostra a continuació, marcant en verd la part principal de l'anàlisi, el rodet.

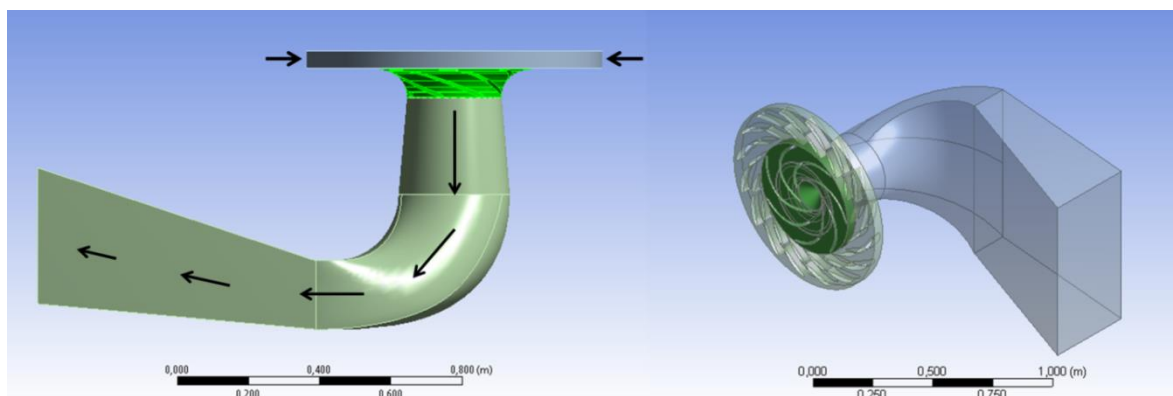


Figura 31. Geometria emprada per a la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

3.2. FASE 2. Disseny de les geometries del rodet

El pre-procès d'aquest treball consisteix en el disseny de les geometries del rodet que, posteriorment, es procedirà a analitzar. En aquest cas, es disposa de l'estator, del tub d'aspiració i del rotor modelats prèviament en 3D, format SolidWorks. Per tant, es procedeix a dur a terme petites modificacions a la sortida del rotor respecte la geometria original (rotor sense danys). És important mencionar que, degut a que la geometria original de la turbina és de dimensions considerables, a l'hora de fer les simulacions s'ha hagut de realitzar un escalat a través de les lleis de semblança, per poder agilitzar i simplificar l'estudi i les simulacions.

A la Taula 1 es mostren les dimensions i les característiques de funcionament del prototip original i a la Taula 2, les dimensions del nou model.

Prototip - original	
Diàmetre rodet, D_o (m)	2,92
Entrada rodet, b_o (m)	0,253
Altura, H_o (m)	400
Cabal, V_o (m ³ /s)	31,25
Velocitat gir, n_o (rpm)	600
Densitat, ρ (kg/m ³)	1000
Viscositat, μ (Pa·s)	0,001
Àleps rodet (Z_R)	7
Àleps directrius (Z_D)	16

Taula 1. Dades turbina original. -Font: Elaboració pròpia.

Model	
Diàmetre rodet, D_m (m)	0,510
Entrada rodet, b_m (m)	0,0442
ρ (kg/m ³)	1000
μ (Pa·s)	0,0010

Taula 2. Dades turbina model. -Font: Elaboració pròpia.

3.2.1. Lleis de semblança aplicades a la turbina

Les lleis de semblança consisteixen en l'estudi de models per tal d'estimar els resultats que es produirien al original. Per poder aplicar aquestes lleis és necessari poder afirmar que el model emprat és semblant l'original, complint tres condicions: semblança geomètrica, semblança cinemàtica i semblança dinàmica.

Per a que un model tingui semblança geomètrica amb un prototip, aquest ha de posseir una forma idèntica amb una diferència de dimensions, la qual és representada per un factor d'escala (λ).

$$\lambda = \frac{D_1 (model)}{D_1 (original)} = \frac{0,51}{2,92} = 0,1746 \quad (18)$$

Per a la resta de condicions, es parteix de la base que el model i l'original són turbomàquines amb fluxos subsònics¹ i que per tant, han de tenir el mateix nombre de Reynolds:

¹ Fluxos compressibles que són classificats pel número de Mach ($M > 0,3$). Essent aquets com $M = \frac{v}{a}$, on v és la velocitat del fluid i a és la velocitat del so al fluid. No hi ha ones de xoc en el flux.

$$Re_{model} = Re_{original} \rightarrow \frac{D_m \cdot u_m}{\nu_m} = \frac{D_o \cdot u_o}{\nu_o} \quad (19)$$

D'on es dedueix que les viscositats tan en el model com en l'original han de ser iguals.

$$D_m \cdot u_m = D_o \cdot u_o \quad (20)$$

És a dir:

$$u_m = u_o \rightarrow \frac{D_m \cdot u_m \cdot \pi}{60} = \frac{D_o \cdot u_o \cdot \pi}{60} \rightarrow u_o = \frac{2,92 \cdot 600 \cdot \pi}{60} = 91,73 \frac{m}{s} \quad (21)$$

$$n_m = \frac{u_o \cdot 60}{\pi \cdot D_m} = \frac{91,73 \cdot 60}{\pi \cdot 0,51} = 3435 \text{ rpm}$$

Pel que fa a l'altura, es dedueix que per a que compleixi la semblança les altures han de coincidir, ja que les velocitats lineals també ho són. Anàlogament podríem trobar l'altura amb el coeficient de càrrega constant (veure equació (23)):

$$\frac{C_o}{C_m} = \sqrt{\frac{H_o}{H_m}} \rightarrow H_m = H_o = 400 \text{ m} \quad (22)$$

$$\Psi = \frac{gH}{\omega^2 D^2} = 0,116574 \rightarrow H = \frac{\Psi \omega^2 D^2}{g} = 400 \text{ m} \quad (23)$$

Finalment, cal conèixer el cabal del model, ja que és un paràmetre rellevant a l'hora de la simulació. Aquest valor s'obté de la relació entre el nombre específic de revolucions (valor adimensional) de l'original i el model, ja que han de ser equivalents.

$$n_{so} = n_{sm} \rightarrow n_{so} = \frac{\omega_o \cdot \sqrt{V}}{(H_o \cdot g)^{3/4}} = \frac{\left(600 \cdot \frac{2\pi}{60}\right) \cdot 31,25^{1/2}}{(400 \cdot g)^{3/4}} = 0,7084 \quad (24)$$

$$V_m = \left(\frac{n_{sm} \cdot (H_o \cdot g)^{3/4}}{\omega_m} \right)^2 = \left(\frac{0,7084 \cdot (400 \cdot g)^{3/4}}{3534 \cdot \frac{2\pi}{60}} \right)^2 = 0,953 \text{ m}^3/\text{s} \quad (25)$$

Els valors calculats, els quals es mostren a la Taula 3, són els que es defineixen a la simulació.

Model	
Diàmetre rodet, D_m (m)	<i>0,510</i>
cabal (m³/s)	<i>0,953</i>
H (m)	<i>400</i>
n (rpm)	<i>3435</i>
ω (rad/s)	<i>359,74</i>
n_s	<i>0,7084</i>

Taula 3. Dades turbina model per introduir a l'Ansys. -Font: Elaboració pròpia.

3.2.2. Geometries a simular

Per a poder estudiar de quina manera afecten els possibles danys produïts a la sortida del rodet de la turbina cal simular les diferents geometries.

1. Geometria original: Geometria de la turbina sense cap dany al rodet. Els seus resultats són la referència del correcte funcionament de la turbomàquina..

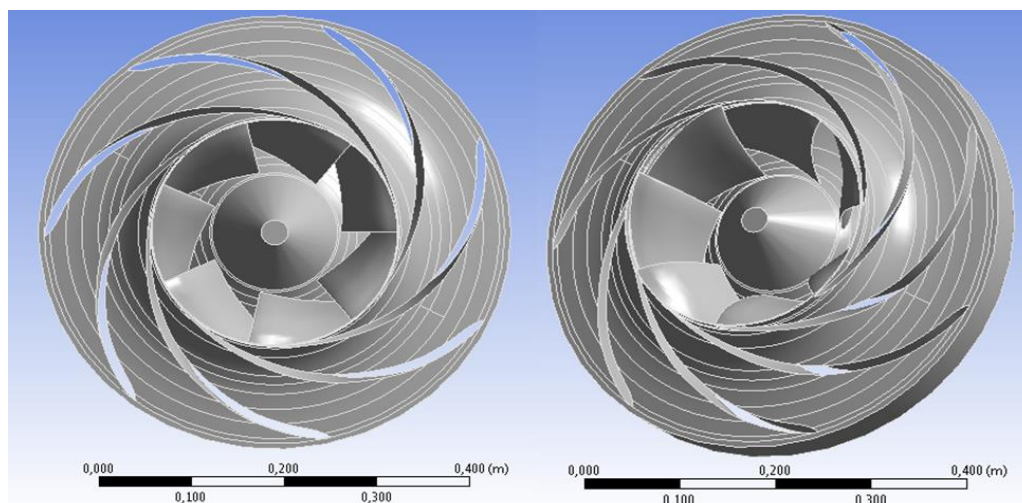


Figura 32. Rotor original. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

2. Dany a la sortida del rodet en un àlep: En aquesta geometria s'ha realitzat un forat a un dels àleps, a la zona de la sortida del rotor, simulant que ha estat malmès per l'erosió produïda per la cavitació de bombolles.

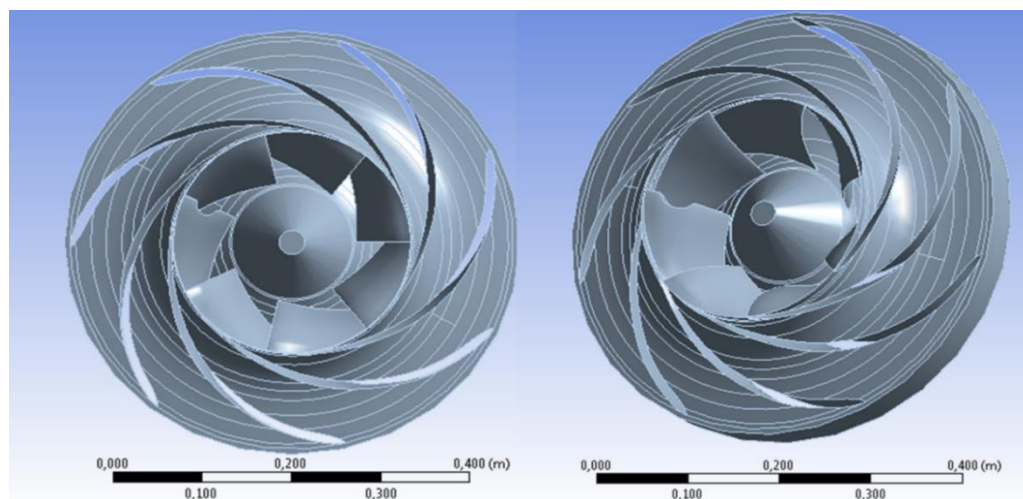


Figura 33. Rotor amb un àlep malmès. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

3. Dany a la sortida del rodet en tots els àleps: En aquest cas es simula que tots els àleps han estat malmesos degut a la cavitació de bombolles a la sortida del rodet. Els forats realitzats a cada àlep són similars al forat de la geometria anterior, tot i que són lleugerament menors.

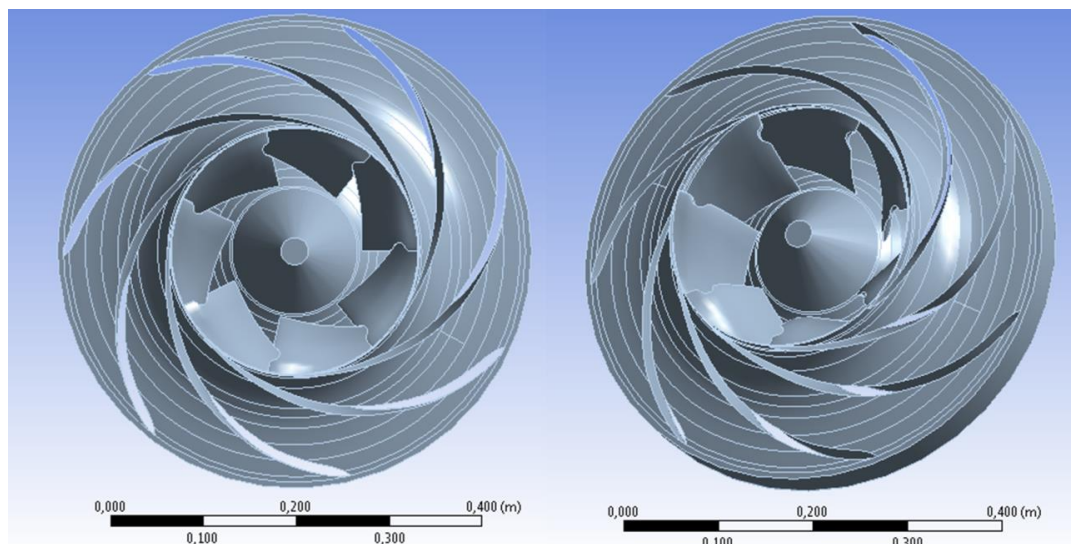


Figura 34. Rotor amb tots els àleps malmesos. -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.*

3.3. FASE 3. Elaboració de les malles

Un cop es disposa de totes les geometries que són objecte d'estudi, es procedeix a la confecció de les seves respectives malles. Cal tenir en compte però, un aspecte determinant a l'hora de crear un mallat vàlid: el nombre d'elements del qual es compon la malla. Aquest consisteix en la quantitat d'elements en què es discretitza la geometria a l'hora de realitzar l'anàlisi.

Si bé és lògic pensar que la millor malla serà aquella que contingui el màxim nombre d'elements possibles doncs els valors obtinguts seran molt més acurats, no sempre és així. En augmentar el nombre d'elements, augmenta també el grau de complexitat de la malla i, com a conseqüència, el temps de càlcul. A més a més, si la complexitat és massa alta, es pot donar el cas que el programa de simulació no arribi a trobar una solució comuna per a tots els elements. Per aquest motiu, resulta crucial escollir un valor d'elements constituents de la malla que permeti obtenir solucions coherents dins d'un marge d'error admissible i amb un temps de càlcul raonable.

Cal mencionar que, per a la realització del present treball, només s'han hagut de mallar les dues noves geometries del rotor, ja que la geometria del rodet original i les geometries corresponents a l'estator i al tub d'aspiració han sigut donades.

Per a la confecció de les malles dels rotors malmesos, s'ha emprat l'eina *Meshing* que proporciona l'*Ansys CFX*. Aquesta eina proporciona varies funcions per tal de fer les malles més precises.

- **Body Sizing:** Eina que permet controlar de manera general la mida màxima de les cel·les de la malla per tota la geometria. En el present projecte no ha estat necessari fer ús d'aquesta funció.
- **Edge Sizing:** Eina que permet refinar la malla al voltant de les arestes en les que es vol obtenir més informació o es pretén obtenir una informació més detallada. En el present projecte no ha estat necessari refinar la malla en cap aresta i, per tant, aquesta funció no ha estat emprada.

- **Face Sizing:** Eina que ens permet controlar la mida de les cel·les a les superfícies o cares en les que és necessari obtenir una informació més precisa. En aquest projecte s'ha fet ús d'aquesta eina per a controlar la malla a l'entrada i a la sortida del rotor, així com als seus àleps. Per a la configuració d'un àlep trencat la configuració del *Face Sizing* quedaria de la següent manera:

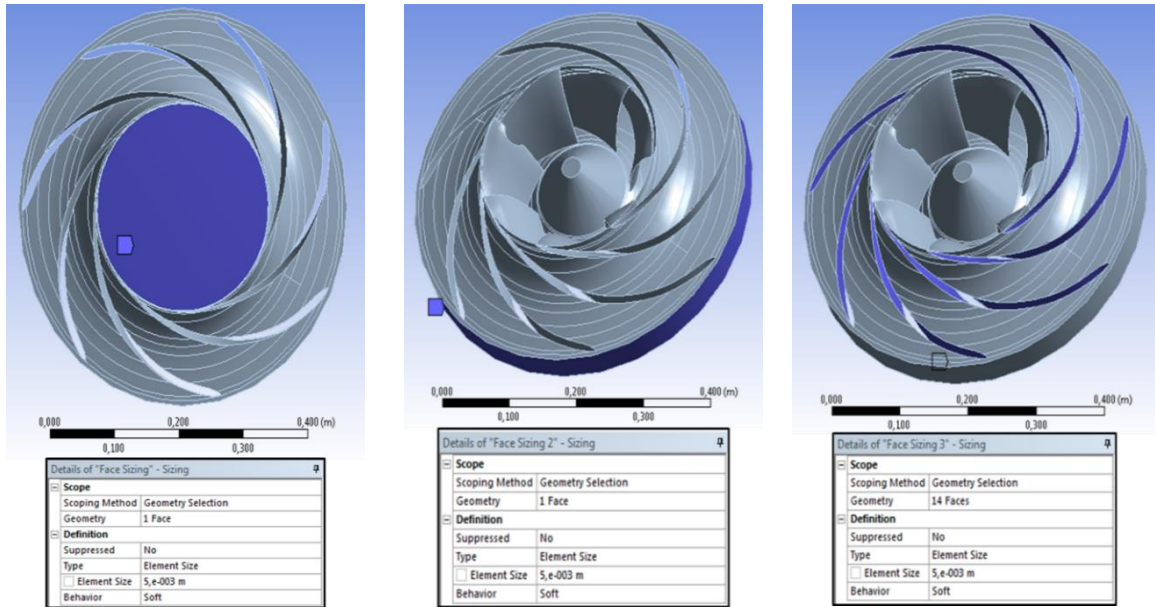


Figura 35. Configuració del *Face Sizing* a la sortida, a l'entrada i als àleps respectivament (un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

En quant a tots els àleps danyats, la configuració del *Face Sizing* resulta tal i com es mostra a la següent figura:

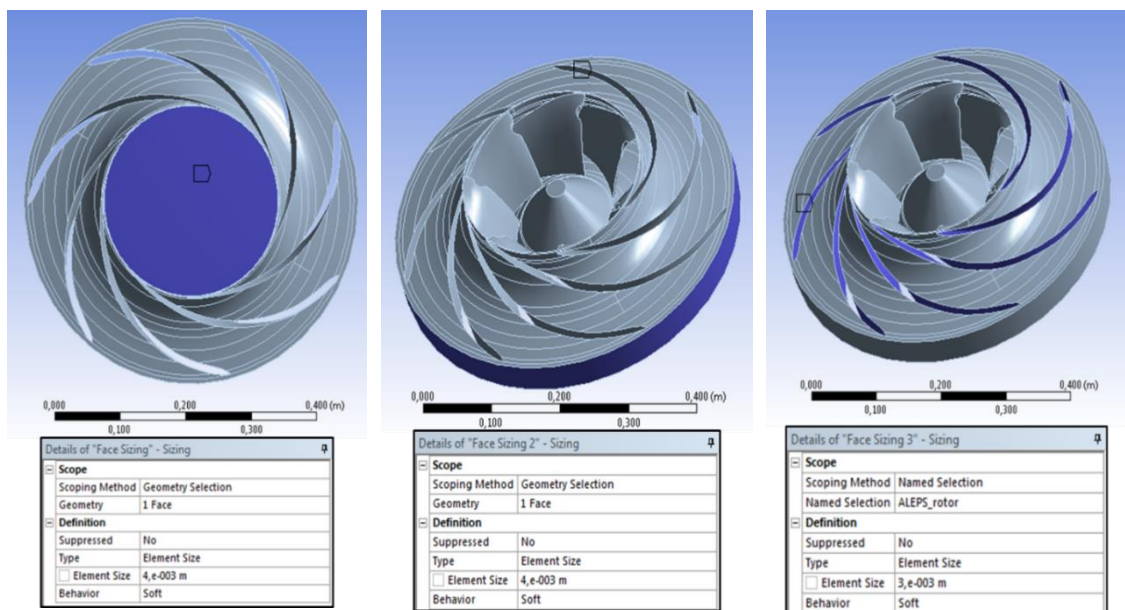


Figura 36. Configuració del *Face Sizing* a la sortida, a l'entrada i als àleps respectivament (tots àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A les figures de la configuració del *Face Sizing*, es poden apreciar certes variacions en la mida dels elements si comparem la casuística de tots els àleps danyats vs. un àlep trencat. En les configuracions de la sortida i l'entrada, quan es tracta de tots els àleps trencats, s'ha optat per reduir la mida dels elements per a poder veure si hi ha diferències entre els resultats de les dues simulacions, ja que a priori, la informació hauria de ser més precisa doncs s'adapta millor a la geometria. Pel que fa al *Face Sizing* dels àleps, s'ha minimitzat la mida dels elements encara més per assegurar la convergència de la malla al adaptar-se a la geometria de cada forat.

- **Inflation:** Eina que permet realitzar un control detallat de la malla a la capa límit. És a dir, a la zona on es produeix el desprendiment de la capa límit, es crea una malla d'una precisió considerable amb el fi de poder veure què succeeix quan el fluid flueix al voltant de les respectives superfícies. Aquesta eina resulta útil quan no és necessari fer una malla general molt fina, fet que podria disparar el temps de càlcul, sinó que fa la malla més fina on hi ha una major variació de resultats.

Per aquest motiu, s'ha fet servir aquesta eina al voltant dels àleps del rotor amb la finalitat de poder captar amb major precisió el desprendiment de la capa límit (veure Figura 37).

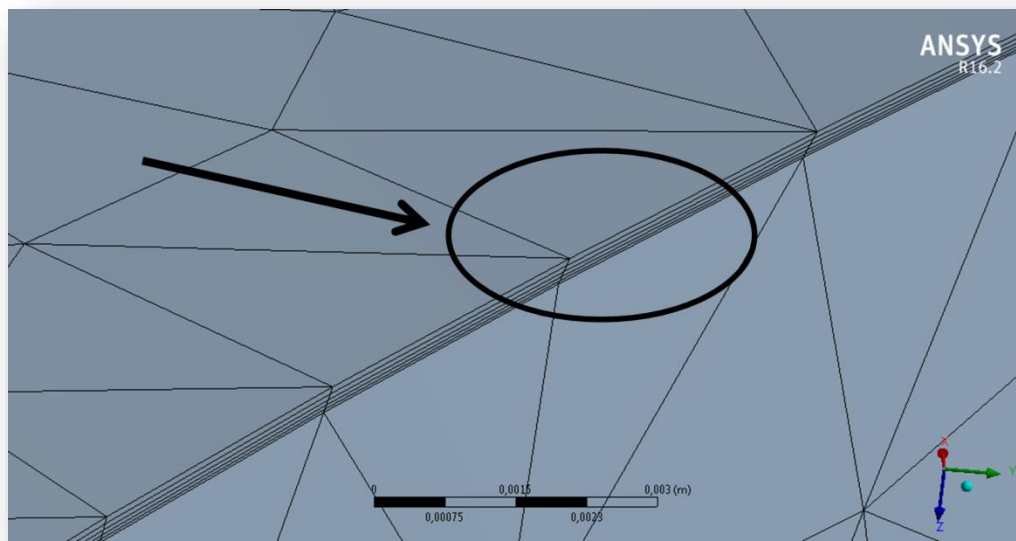


Figura 37. Capes del *Inflation* al voltant dels àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Aquesta eina es defineix mitjançant els següents paràmetres: la distància que existeix entre la superfície dels àleps i la primera capa (*First Layer Thickness*), el gruix màxim entre capes (*Maximum Thickness*), el nombre de capes que hi hauran (*Maximum Layers*) i el rati de creixement que tindran les capes (*Growth Rate*).

Dit això, cal introduir el valor de y^+ . Aquest valor es correspon a un valor adimensional que és emprat per a poder descriure la mida de la malla, és a dir, si una malla és fina o gruixuda.

Existeixen dues maneres de modelar el *Inflation* amb el valor de y^+ :

- A través de les funcions de paret (*fully turbulent region*): Aquestes funcions utilitzen perfils adimensionals per predir la capa límit a la zona de turbulència. Aquesta funció depèn del nombre de Reynolds del sistema, ja que, a mesura que el Reynolds incrementa, el valor de y^+ augmenta. Habitualment es treballa amb valors de $30 < y^+ < 300$.
- Calculant la subcapa viscosa (*viscous sublayer*): En aquest mètode de càlcul, el qual s'aplica a la zona de la subcapa viscosa, el valor de y^+ no pot ser major a 5 i el ràtio de creixement no pot superar el valor de 1,5. D'aquesta forma es pot assegurar que la malla podrà resoldre sense gaires complicacions els gradients que es generen a la subcapa. Es defineix el valor de y^+ de la següent manera:

$$y^+ = \frac{y \cdot u_f}{\mu_c} \quad (26)$$

A les malles de les geometries s'ha optat per emprar l'opció de *Total Thickness*, la qual permet establir el gruix màxim entre les capes (*Maximum Thickness*) de l'*Inflation*, ja que facilita, quan la malla retorna algun error, poder anar variant aquest nombre i, així, anar refinant la malla.

Per la primera malla, la d'un àlep danyat, s'ha establert un gruix màxim entre les 5 capes de 0,0006 m amb un ràtio de creixement d'1,2. Seguint la mateixa línia, pel mallat del rotor amb tots els àleps malmesos, s'han hagut de variar alguns detalls respecte el mallat anterior. Aquestes variacions han estat el *Maximum Thickness* amb un valor de 0,0005 m i el ràtio de creixement a 1,4 (veure Figura 38). Aquestes modificacions són degudes a que, al tenir més forats la geometria, les mateixes condicions que la malla anterior no resulten suficients, i per tant, s'ha optat per reduir lleugerament la distància entre capes i augmentar el ràtio de creixement de les capes, per tal que les cel·les de la malla pugin adaptar-se millor als forats. Tot això, implica que la malla del rotor amb tots els àleps danyats tingui més elements que la que té un àlep malmès (veure Figura 41 i Figura 40).

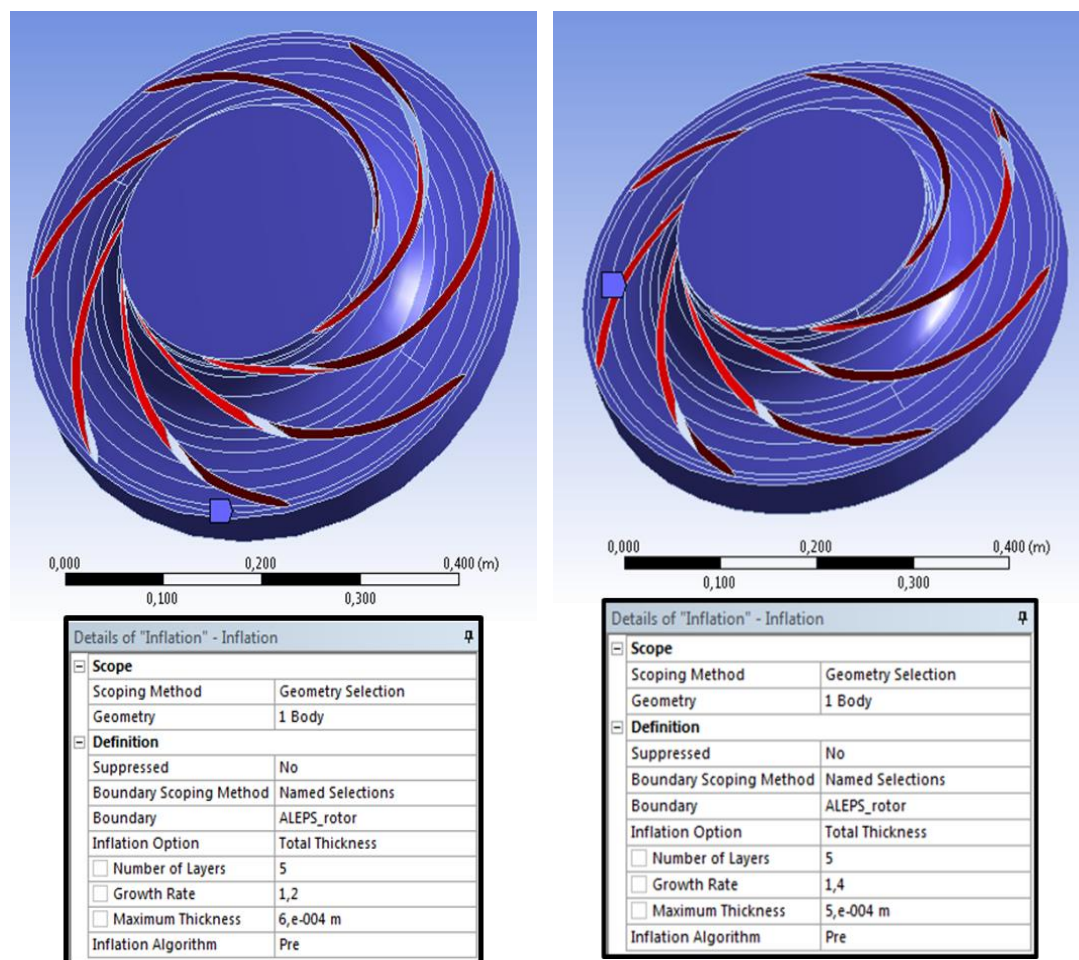


Figura 38. Configuració del *Inflation* per a un àlep malmès VS tots malmesos. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

En darrer terme, s'estableix la mida de tots aquells elements de la malla que no tenen aplicats cap *Face Sizing*, ni *Inflation*. La mida seleccionada ha estat de 0,01 m, ja que aquest valor garanteix un nombre final d'elements acceptable. A la Figura 39 es mostren els paràmetres generals comuns a les simulacions.

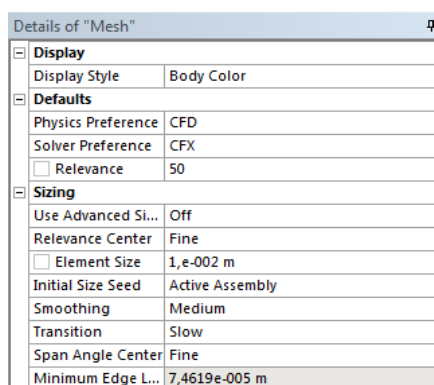


Figura 39. Configuració general de les malles. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Finalment, les malles dels rotors queden tal i com es mostra a les Figura 41 i Figura 40:

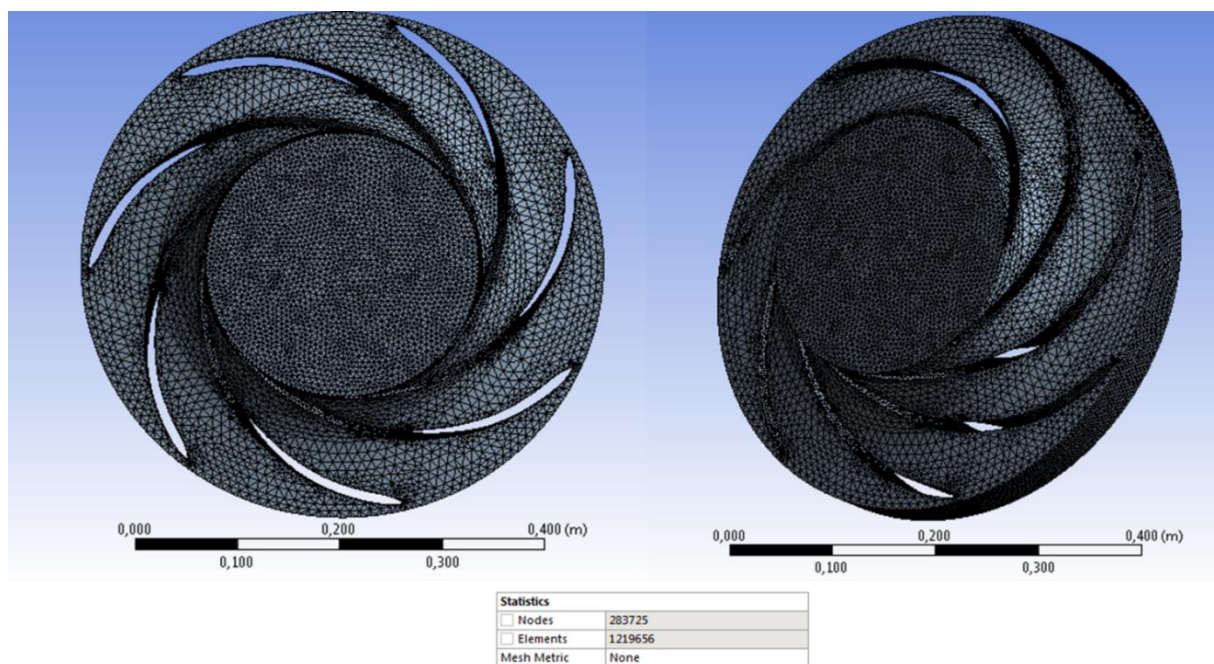


Figura 41. Malla rotor amb un àlep danyat. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

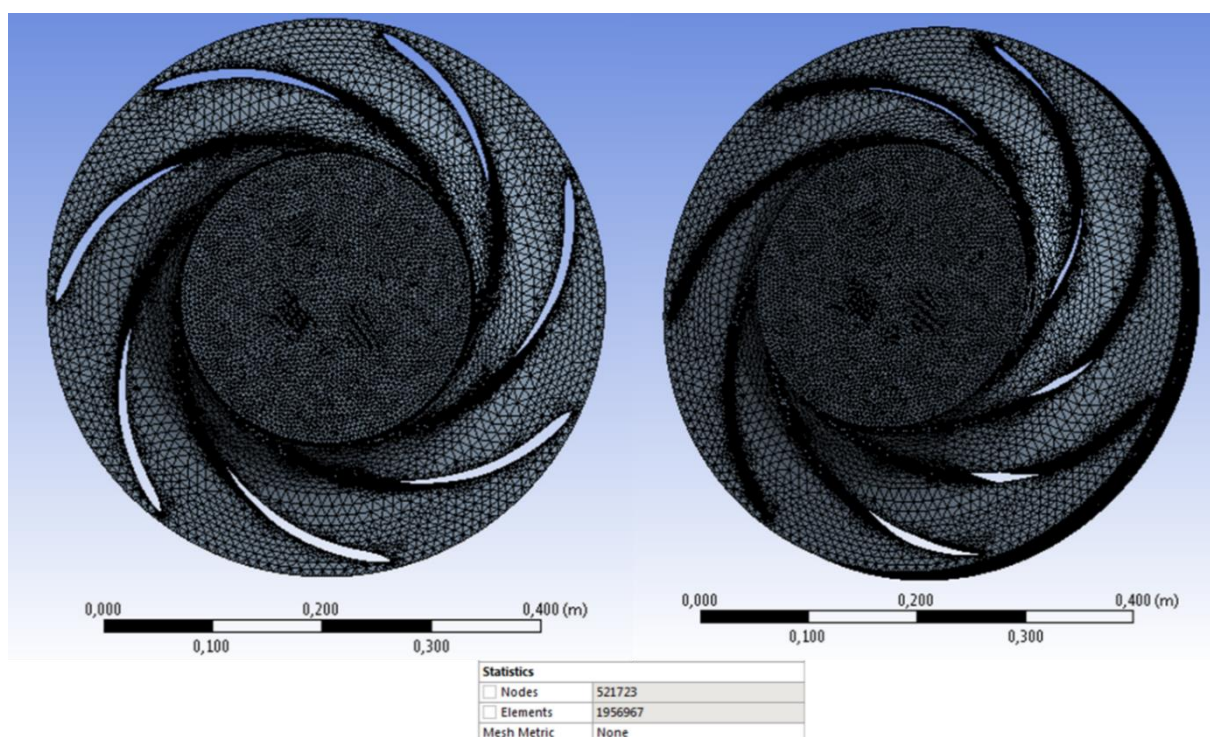


Figura 40. Malla rotor amb tots els àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

3.4. FASE 4. Configuració de les simulacions

Un vegada es disposa del mallat, es configura el software per tal de resoldre cada cas d'estudi, introduint condicions de contorn que s'adeqüin al cas real i així obtenir solucions fidedignes. Al introduir les geometries del tub d'aspiració, l'estator i el rotor, juntament amb les seves respectives malles al programa Ansys CFX, cal configurar el *Setup* amb les condicions pertinents..

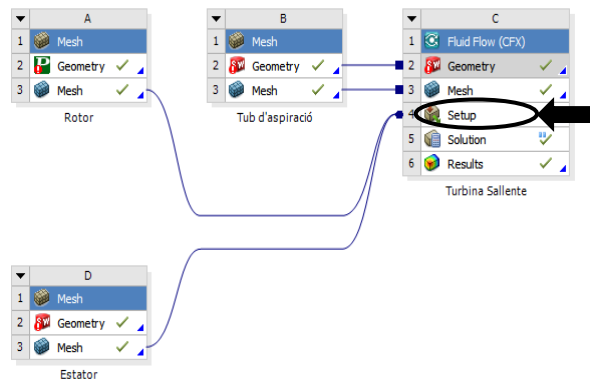


Figura 42. Setup de la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys

3.4.1. Paràmetres generals

En primer lloc, cal tenir en compte que el rotor no és una peça fixa, sinó que està rotant. Per tant, és necessari definir la duració que tindrà cada iteració de càlcul. S'estableix que aquest interval de temps és el que triga el rotor de la turbina en girar un grau de volta. Per determinar aquest valor, es parteix de les revolucions per minut amb que gira el rotor i que s'han obtingut a l'equació (21):

$$3435 \text{ rpm} \cdot \frac{1 \text{ minut}}{60 \text{ segons}} = 57,25 \text{ rev/seg} \quad (27)$$

$$\frac{1}{57,25 \text{ rev/seg}} = 0,01746 \text{ seg/rev} \quad (28)$$

$$0,01746 \frac{\text{seg}}{\text{rev}} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{360 \text{ graus}} = 4,852 \cdot 10^{-5} \frac{\text{seg}}{\text{graus}} \quad (29)$$

L'interval de temps obtingut per a calcular cada iteració és de $4,852 \cdot 10^{-5}$ s. Així mateix, s'estableix un temps màxim de duració de la simulació de 10.000 segons. Altres paràmetres comuns a les simulacions són:

Fluid	Pressió referència (Pa)	Gravetat (m/s^2)	Model turbulència	Temperatura ($^{\circ}C$)	Transferència de calor
<i>Aigua</i>	<i>101300</i>	<i>-9,81</i>	<i>SST $k-\omega$</i>	<i>25</i>	<i>Isotèrmica</i>

Taula 4. Paràmetres comuns a les simulacions. -Font: Elaboració pròpia.

Així mateix, es defineixen els paràmetres que són propis de cada sòlid. A la Taula 5 queden reflectits:

	Tipus de moviment	Velocitat de rotació (rpm)
Tub d'aspiració	<i>Estacionari</i>	<i>0</i>
Rotor	<i>Rotatori</i>	<i>3435</i>
Estator	<i>Estacionari</i>	<i>0</i>

Taula 5. Paràmetres segons la geometria. -Font: Elaboració pròpia.

3.4.2. Condicions de contorn i configuració del Setup

Després de definir els paràmetres generals, es procedeix a introduir les condicions de contorn de cada element al Setup de l'Ansys CFX. En iniciar el Setup, apareix el display (Figura 43), on es mostra la geometria a simular.

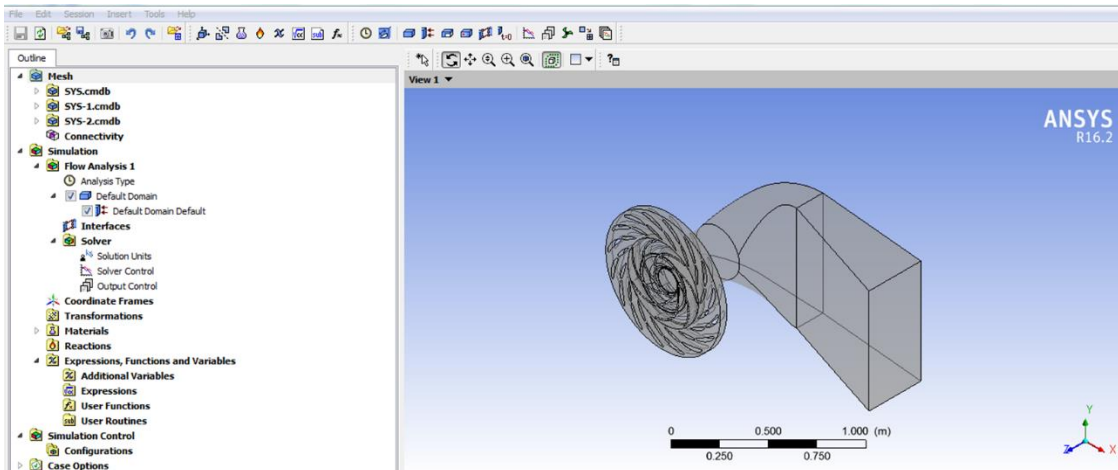


Figura 43. Setup amb la geometria a simular. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Primerament, cal crear els diferents dominis, els quals coincideixen amb les geometries a simular: l'estator, el rotor i el tub d'aspiració (Figura 44):

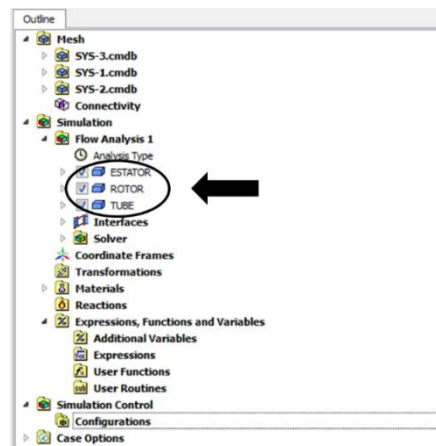


Figura 44. Dominis al Setup. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Tot seguit, es defineixen les *Interfaces* (Figura 45) allà on hi ha dos contorns que interactuen: entre la sortida de l'estator i l'entrada del rotor i entre la sortida del rotor i l'entrada al tub d'aspiració. La primera Interface creada és entre l'estator i el rotor:

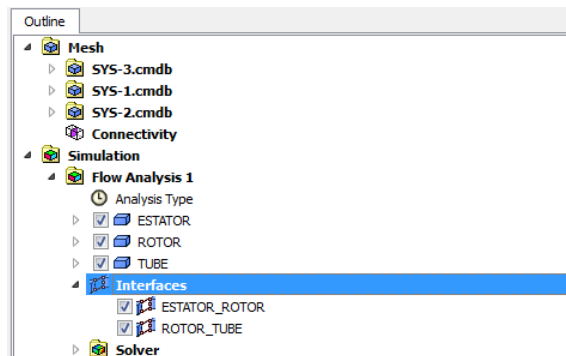


Figura 45. *Interfaces al Setup.* -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Seguidament, es procedirà de la següent manera amb la segona *Interface* localitzada entre la sortida del rotor i l'entrada del tub d'aspiració:

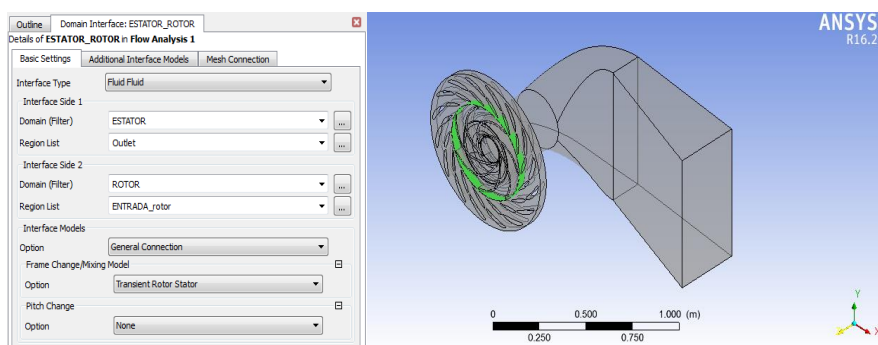


Figura 46. *Configuració Interface estator-rotor.* -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

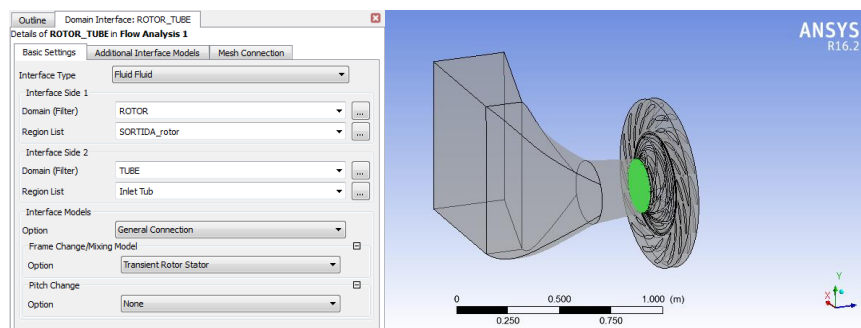


Figura 47. *Configuració Interface rotor-tube.* -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Definides totes les *Interfaces*, es procedeix a definir de manera concreta cada domini, el primer és l'estator. Les configuracions de l'estator es mostren a les següents figures:

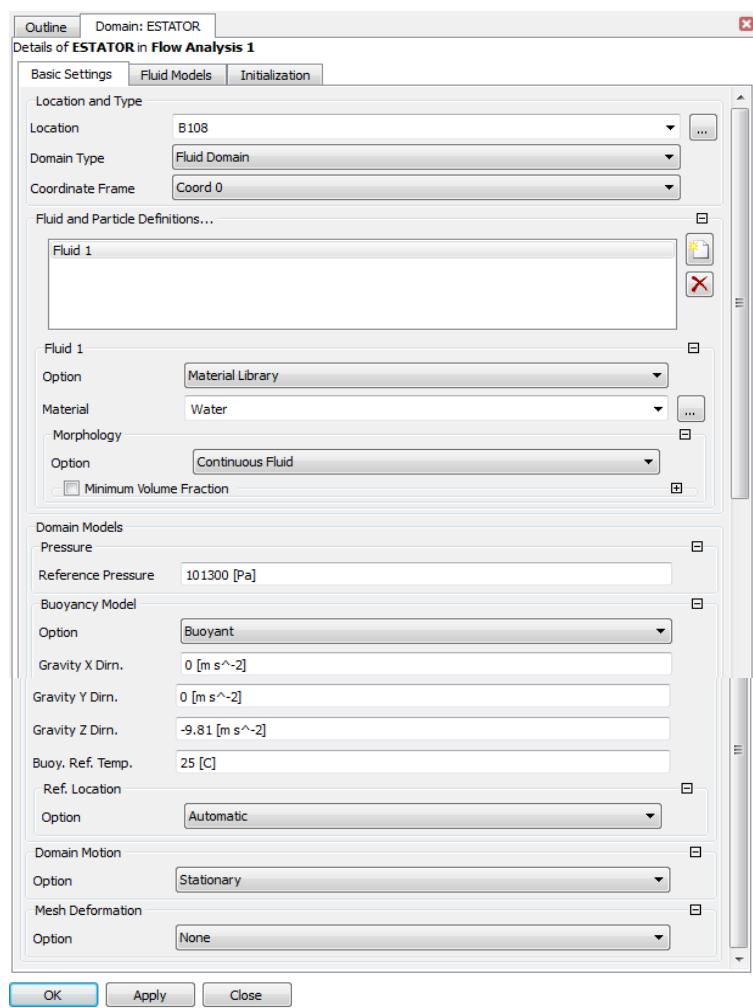


Figura 48. Configuració de l'estator (*Basic Settings*). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

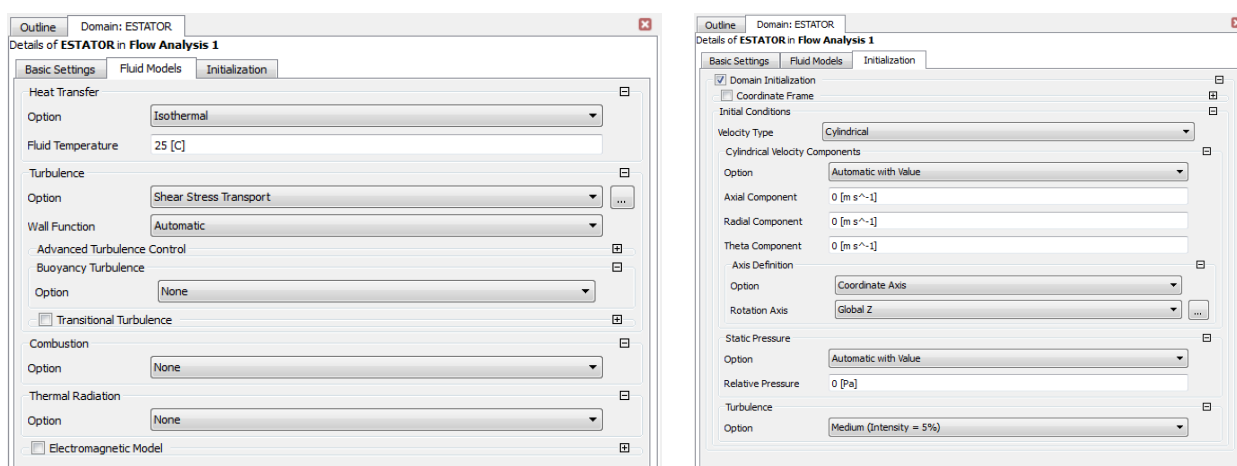


Figura 49. Configuració de l'estator (*Fluid Models i Initialization*). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Dins del domini de l'estator, es creen subdominis que representen les parets de l'estator, els àleps de l'estator, l'entrada del fluid a l'estator, que coincideix amb l'entrada del fluid al sistema), i la sortida del fluid de l'estator, que coincideix amb l'Interface entre l'estator i el rodet (ESTATOR_ROTOR Side 1). A la Figura 50 es poden apreciar els subdominis mencionats.

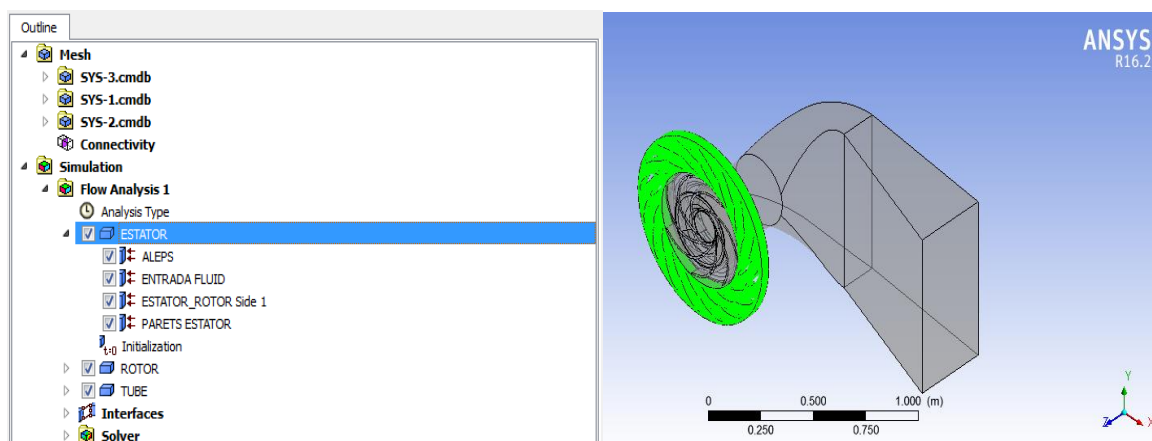


Figura 50. Subdominis de l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A l'hora de definir cada subdomini, cal configurar-lo amb les característiques corresponents. Es comença per la configuració del subdomini dels àleps de l'estator (Figura 50). La configuració Sources no s'ha utilitzat.

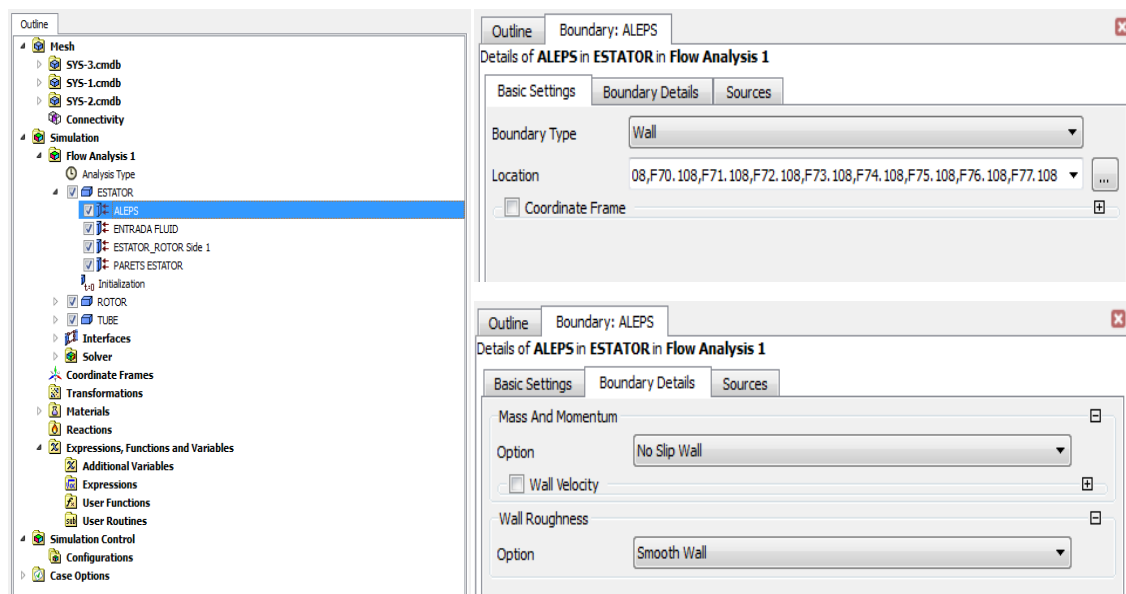


Figura 51. Configuració subdomini dels àleps de l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

La configuració de l'entrada del fluid al sistema i a l'estator queda tal i com es mostra a la Figura 53. Posteriorment, a la Figura 52 es pot apreciar la configuració de la sortida del fluid de l'estator i, finalment, a la Figura 54 es mostra la configuració de les parets de l'estator.

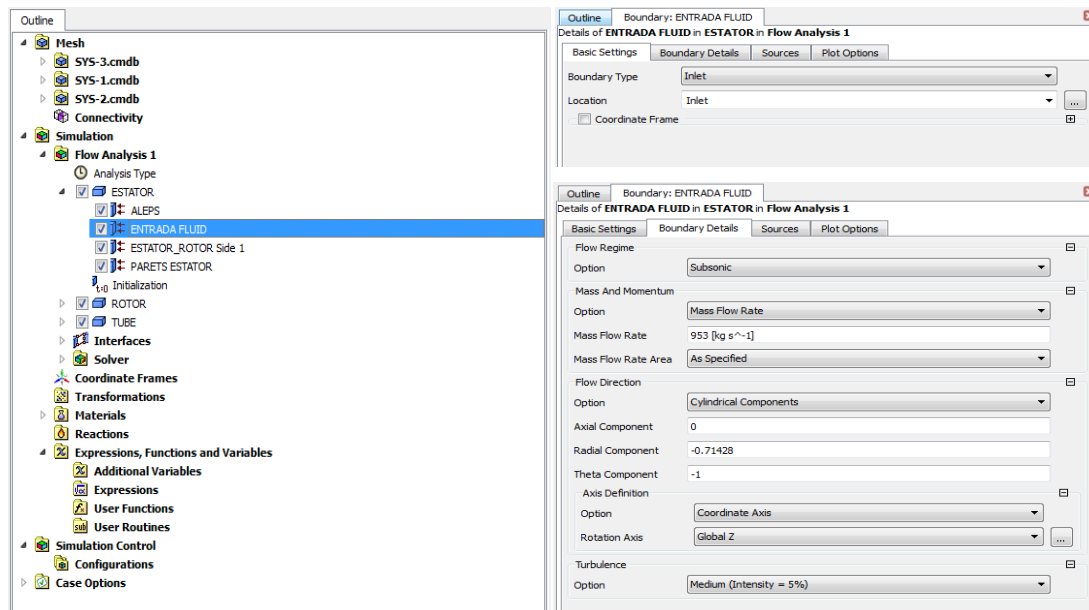


Figura 52. Configuració entrada fluid a l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

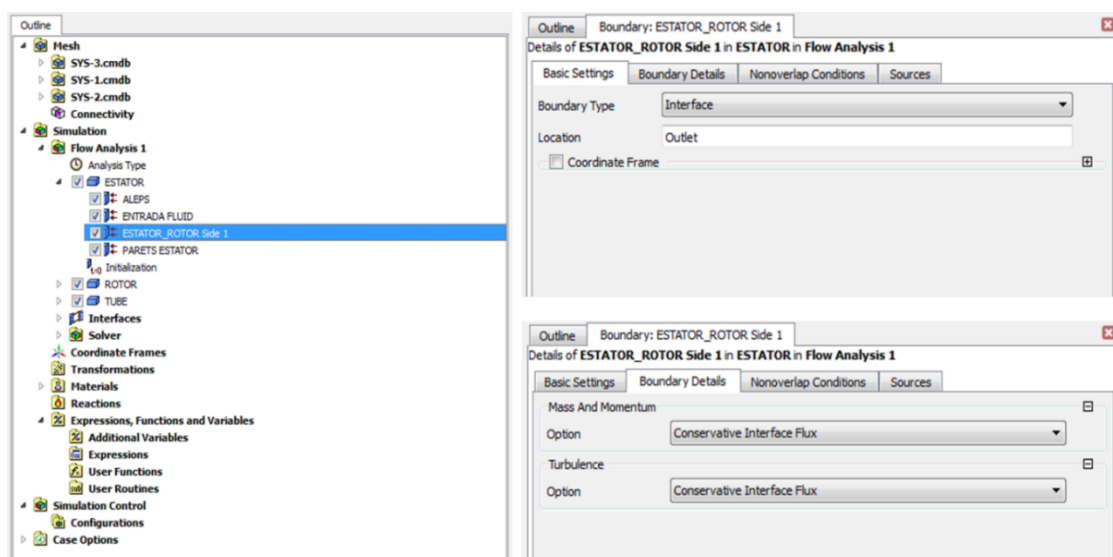


Figura 53. Configuració sortida fluid a l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

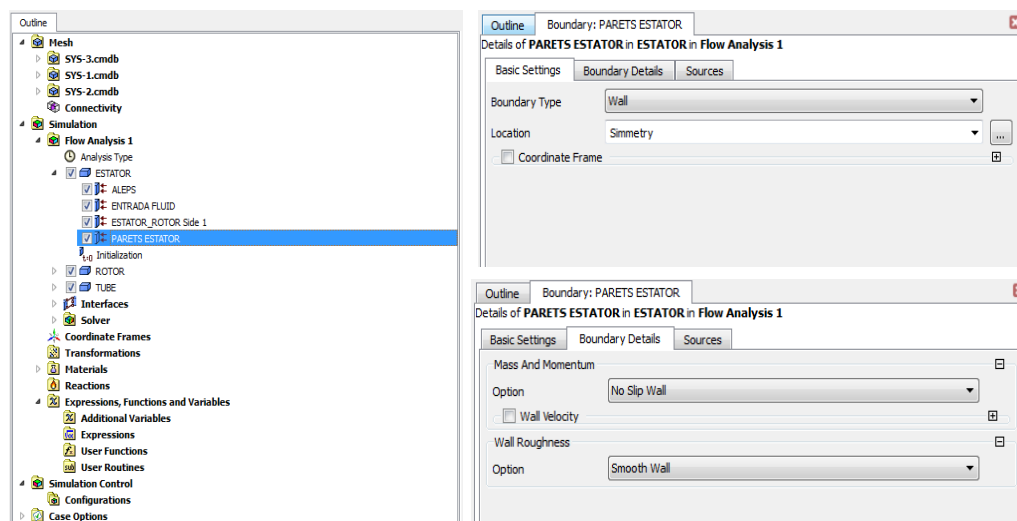


Figura 54. Configuració parets de l'estator. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Fet això, es prossegueix anàlogament amb el domini del rotor, el qual està format també per subdominis. La configuració del rotor és la següent:

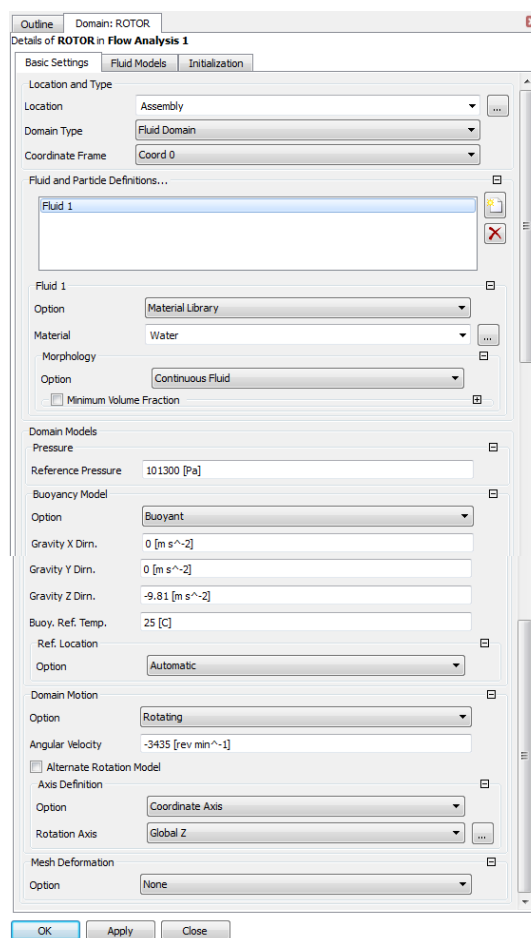


Figura 55. Configuració del rotor (Basic Settings). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

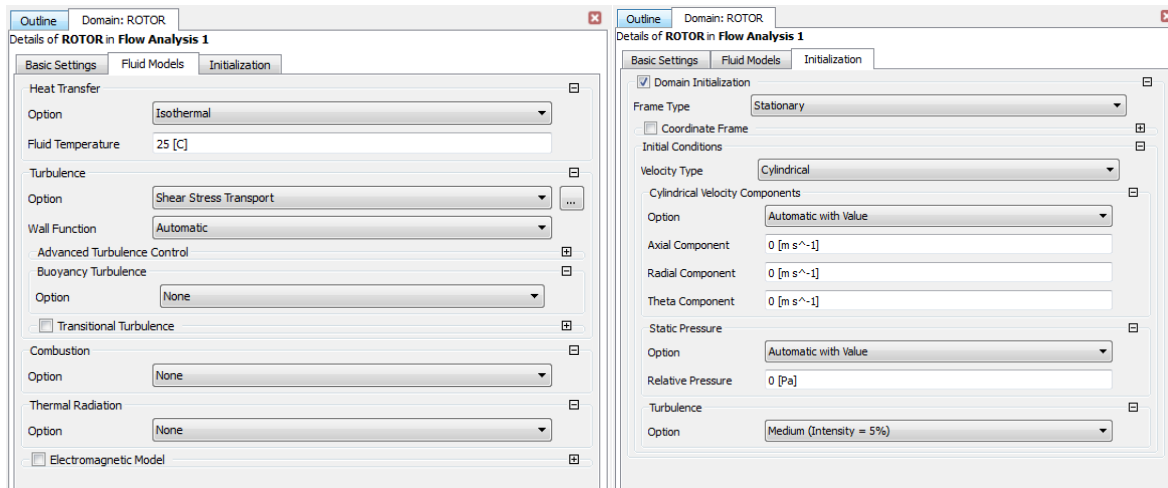


Figura 56. Configuració del rotor (*Fluid Models i Initialization*). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Els subdominis del rotor són: l'entrada del fluid al rotor, que coincideix amb l'*Interface* entre l'estator i el rotor (ESTATOR_ROTOR Side 2), la sortida del fluid del rotor, que coincideix amb l'*Interface* entre el rotor i el tub d'aspiració (ROTOR_TUBE Side 1), els àleps del rotor i, finalment, les parets del rotor (Figura 57).

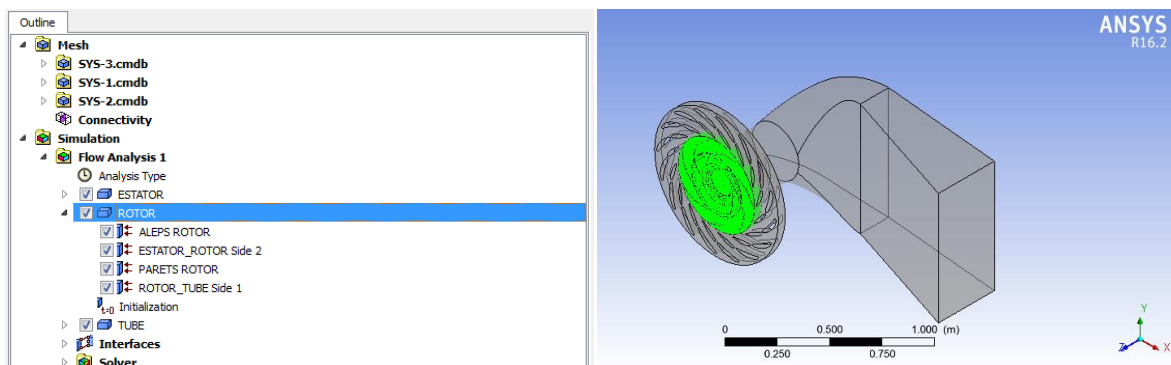


Figura 57. Subdominis del rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Les configuracions dels àleps del rotor (Figura 58), de l'entrada del fluid al rotor (Figura 59), de la sortida del fluid del rotor (Figura 61) i les parets del rotor (Figura 60) es mostren a continuació:

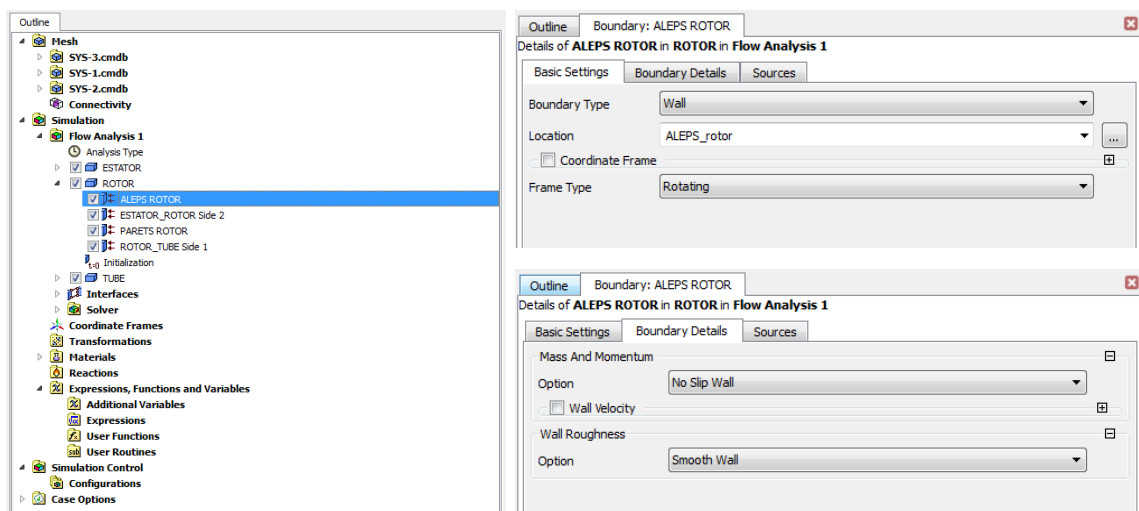


Figura 58. Configuració àleps rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

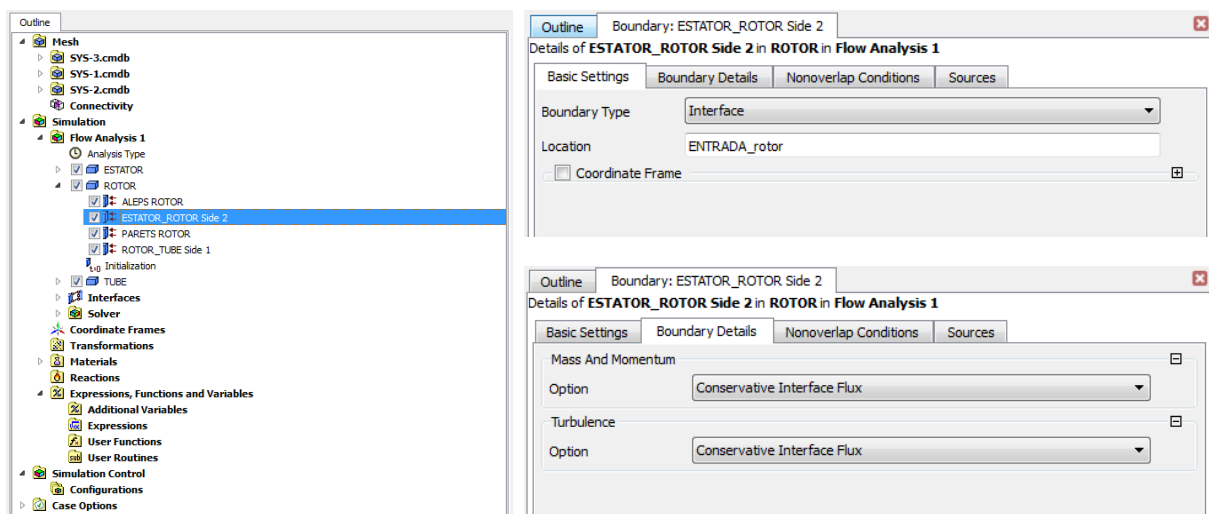


Figura 59. Configuració entrada fluid al rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

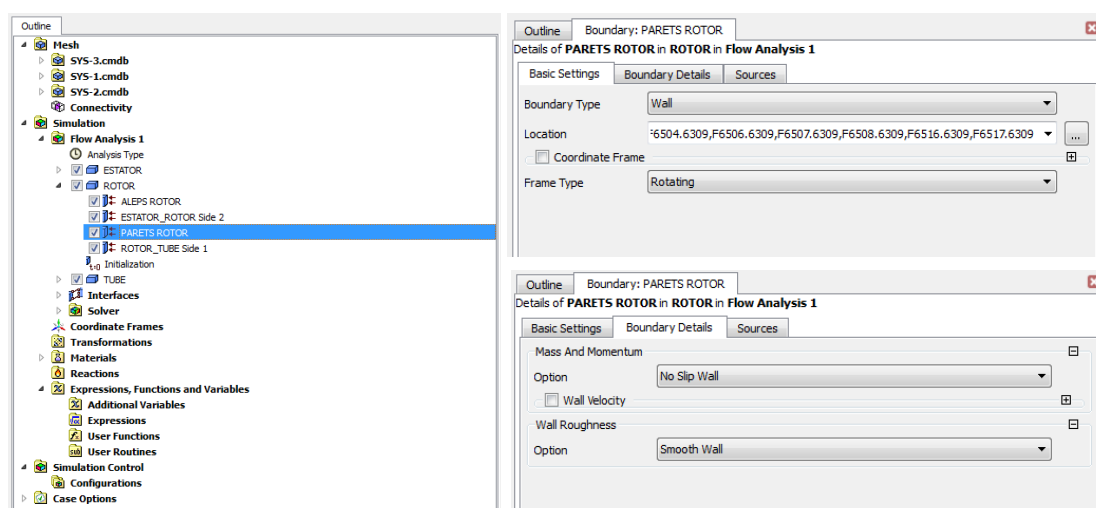


Figura 60. Configuració parets del rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

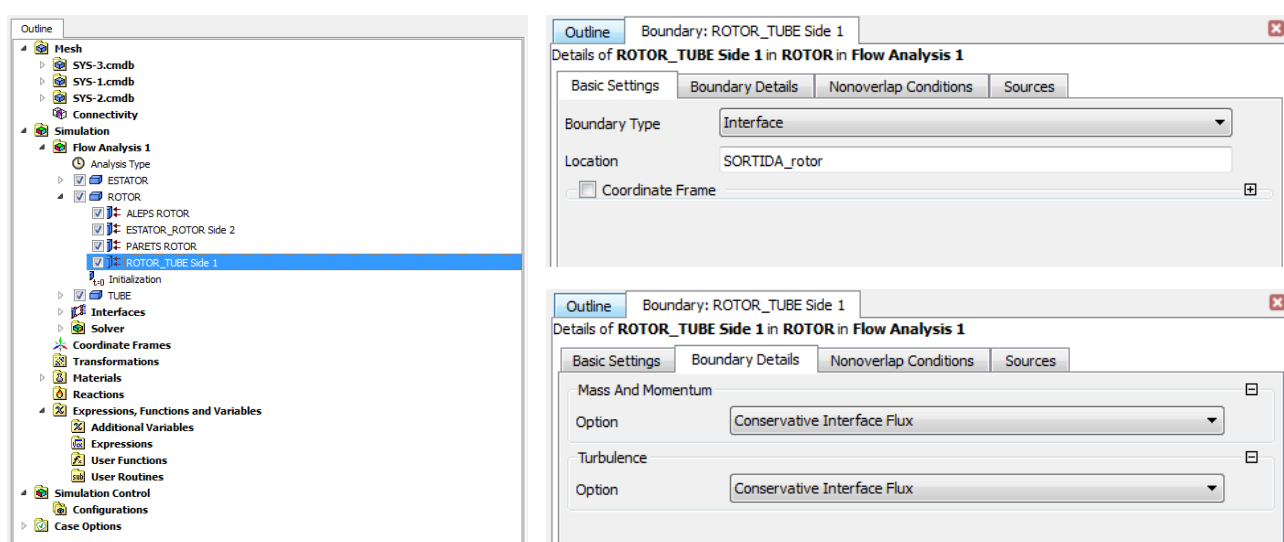


Figura 61. Configuració de la sortida del fluid del rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Per acabar, es procedeix a configurar l'últim domini, el del tub d'aspiració:

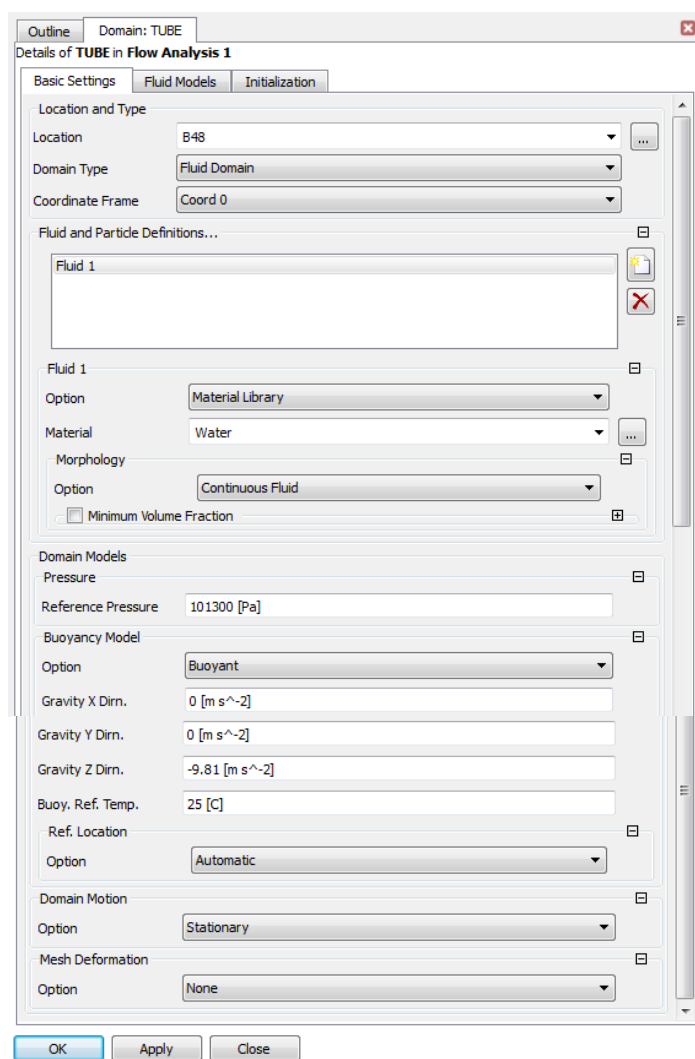


Figura 62. Configuració del tub d'aspiració (Basic Settings). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

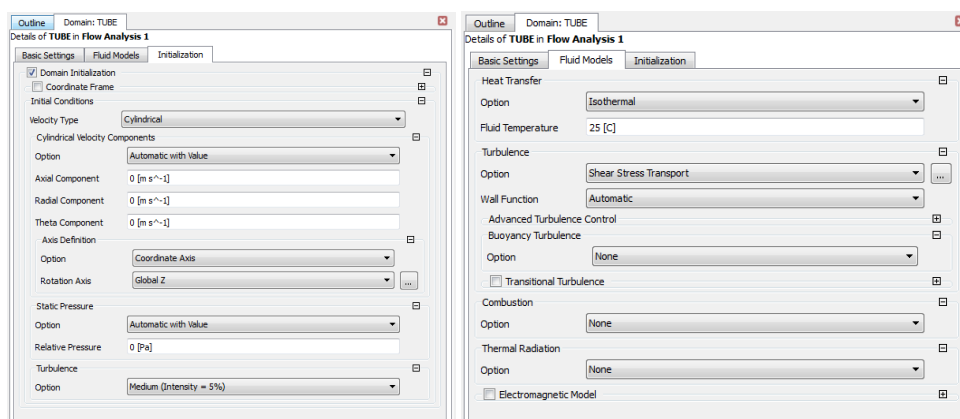


Figura 63. Configuració del tub d'aspiració (Fluid Models i Initialization). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Al tub d'aspiració, també se li afegeixen subdominis, els quals són: les parets del tub d'aspiració, l'entrada del fluid al tub d'aspiració, que coincideix amb l'*Interface* entre el rotor i el tub d'aspiració, i la sortida del fluid del sistema (veure Figura 64).

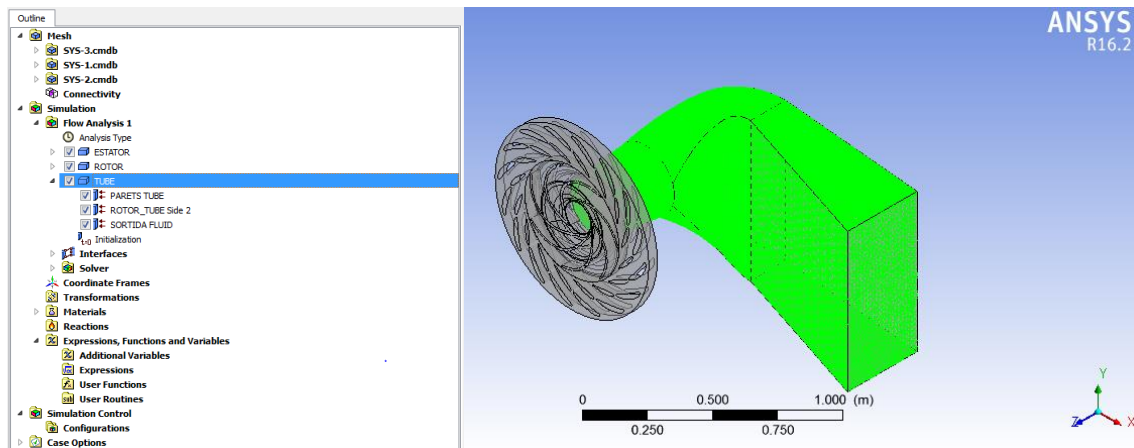


Figura 64. Subdominis del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Pel que fa a les parets del tub d'aspiració, la configuració es mostra a la Figura 65. De la mateixa manera, la configuració de l'entrada del fluid al tub d'aspiració queda reflectida a la Figura 66 i, per últim, la configuració de la sortida del fluid del tub d'aspiració es pot veure a la Figura 67.

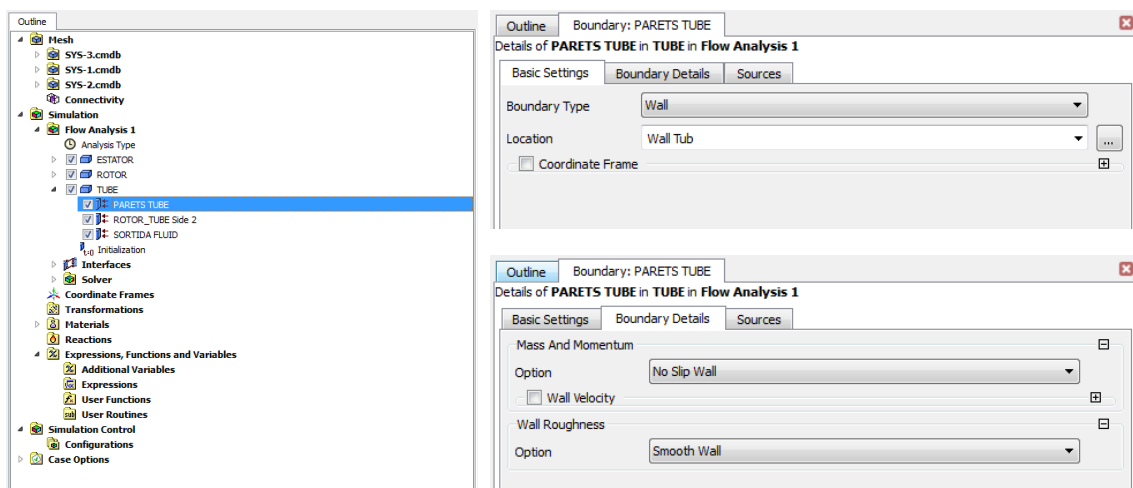


Figura 65. Configuració de les parets del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

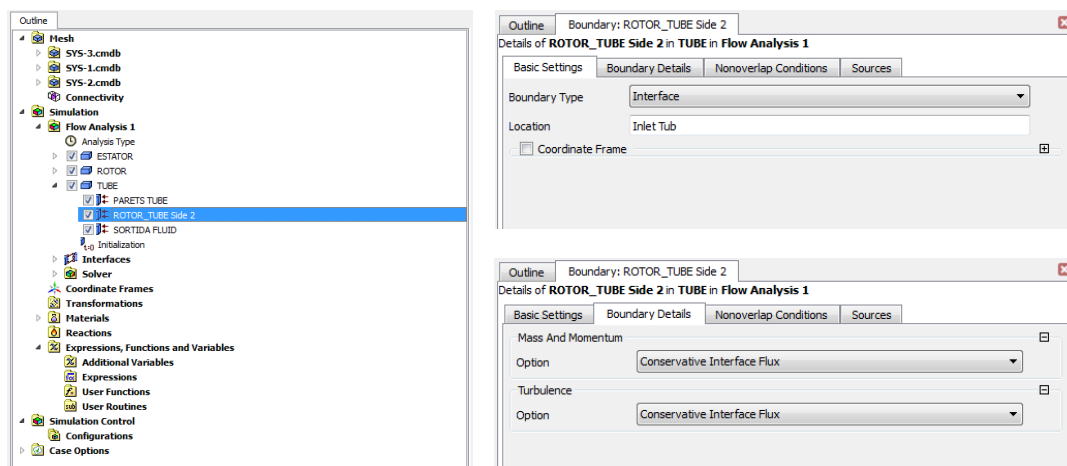


Figura 66. Configuració de l'entrada del fluid al tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

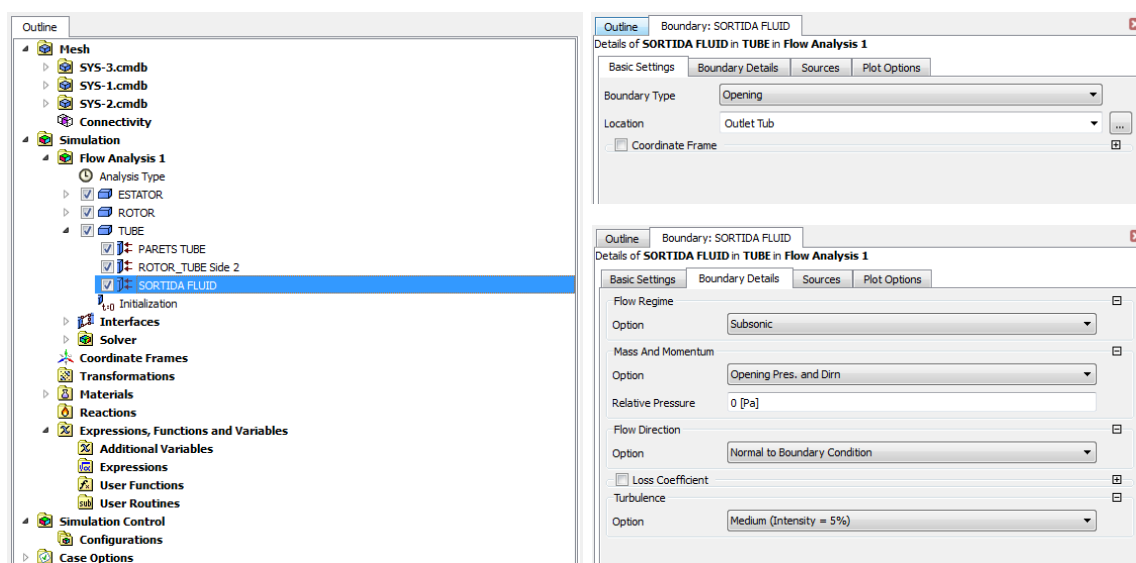


Figura 67. Configuració de la sortida del fluid del tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

3.4.3. Monitors

Concloua la configuració del *Setup*, abans posar a calcular, s'ha optat per afegir una sèrie de monitors (punts dins dels dominis) per tal d'entendre en profunditat els fenòmens involucrats a l'interior de la turbina. Això és degut a que amb els monitors es poden extreure gràfics els quals poden aportar-nos informació de com evolucionen certs fenòmens durant el temps, i això resulta important a l'hora de fer un bon anàlisi i una bona discussió dels resultats.

Dins de la configuració del *Setup* de l'*Ansys CFX*, hi ha la possibilitat d'afegir aquests monitors a les zones on hi hagi un cert interès computacional. La funció primordial d'aquests monitors és la de poder exportar una taula de valors de les dades que s'han predefinit abans de la simulació. Hi ha dos tipus de monitors, els que es defineixen mitjançant una expressió o fórmula (la calcula dins del domini on s'aplica) i els que es defineixen amb unes coordenades cilíndriques (calculen en el punt exacte on s'ubica el monitor).

Els monitors que es defineixen mitjançant expressions són per obtenir valors de forces de *drag* i *lift* als àleps de l'estator, concretament als *guide vanes*. També s'aplicaran aquestes expressions als àleps del rotor. A la Taula 6 es poden veure els monitors definits per expressions:

Expressions	
F_D (<i>guide vane</i>)	<i>areaInt(Wall Shear)@REGION:GuideVane</i>
F_L (<i>guide vane</i>)	<i>areaInt(Wall Shear)@REGION:GuideVane</i>
F_D (àleps rotor)	<i>areaInt(Wall Shear)@REGION:AlepsRotor</i>
F_L (àleps rotor)	<i>areaInt(Wall Shear)@REGION:AlepsRotor</i>

Taula 6. Expressions per calcular forces de *drag* i *lift*. -Font: Elaboració pròpia.

Tot seguit, a la Taula 7 es mostren tots els monitors definits per coordenades en els punts seleccionats per tal d'obtenir les pressions en cada instant de temps.

Punt	Axial (m)	Radial (m)	Theta (°)	variable	Position update frequency
Rotor 1	0	0,225	-15	pressure	Every time step
Rotor 2	0	0,175	20	pressure	Every time step
Rotor 3	-0,02	0,125	45	pressure	Every time step
Estator 1	0	0,275	-5	pressure	Initial mesh only
Estator 2	0	0,35	-5	pressure	Initial mesh only
Estator 3	0	0,33	0	pressure	Initial mesh only
IF1	0	0,249	-11	pressure	Every time step
IF2	0	0,249	-22	pressure	Every time step
IF3	0	0,249	-33	pressure	Every time step
IF4	0	0,249	-44	pressure	Every time step
IF5	0	0,249	-55	pressure	Every time step
Tube 1	-0,10	0	0	pressure	Initial mesh only
Tube 2	-0,15	0	0	pressure	Initial mesh only
Tube 3	0,20	0	0	pressure	Initial mesh only
Tube 4	0,25	0	0	pressure	Initial mesh only
Tube 5	0,30	0	0	pressure	Initial mesh only

Taula 7. Coordenades i característiques dels monitors. -Font: Elaboració pròpia.

Punt	x (m)	y (m)	z (m)	variable	Position update frequency
Tube 1 = 0.3D	0,139	0	-0,185	pressure	Initial mesh only
Tube 2 = D	0,154	0	-0,373	pressure	Initial mesh only

Taula 8. Nous monitors al tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia.

Per a la primera simulació (un àlep malmès) s'han introduït els monitors de la Taula 7, però a la segona simulació (tots els àleps malmesos) hi ha una variació. Per a la segona simulació s'han introduït els mateixos que en la primera simulació però els punts del tub d'aspiració s'han canviat pels que es mostren a la Taula 8 per motius que més endavant queden explicats (veure Figura 70). El valor de D s'ha considerat com al diàmetre de sortida del rodet, $D=0,268\text{m}$.

El procediment per afegir o treure aquets monitors és senzill. Cal entrar a *Output Control* i dins de l'apartat *Monitor* s'afegeixen. La manera d'introduir, ja sigui per expressió com per coordenades, es pot veure a la següent Figura 68. Introducció dels monitors.

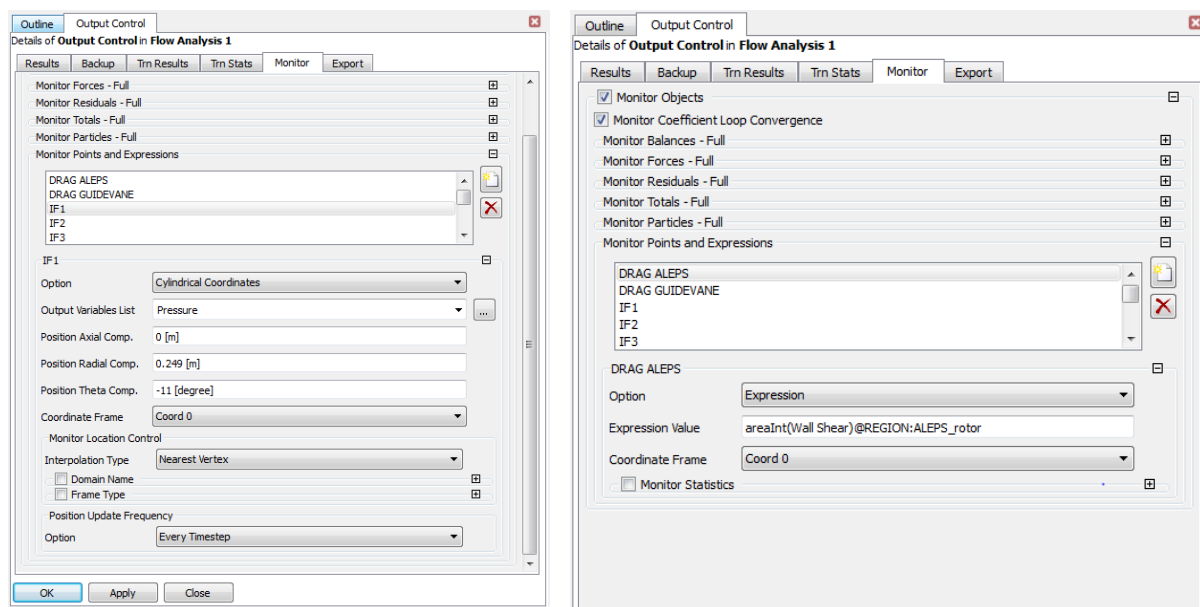


Figura 68. Introducció dels monitors. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Finalment, introduïts tots els monitors a tenir en compte després de la simulació es dona per finalitzada la configuració del *Setup* al CFX i es procedeix a la següent fase, el post-procés.

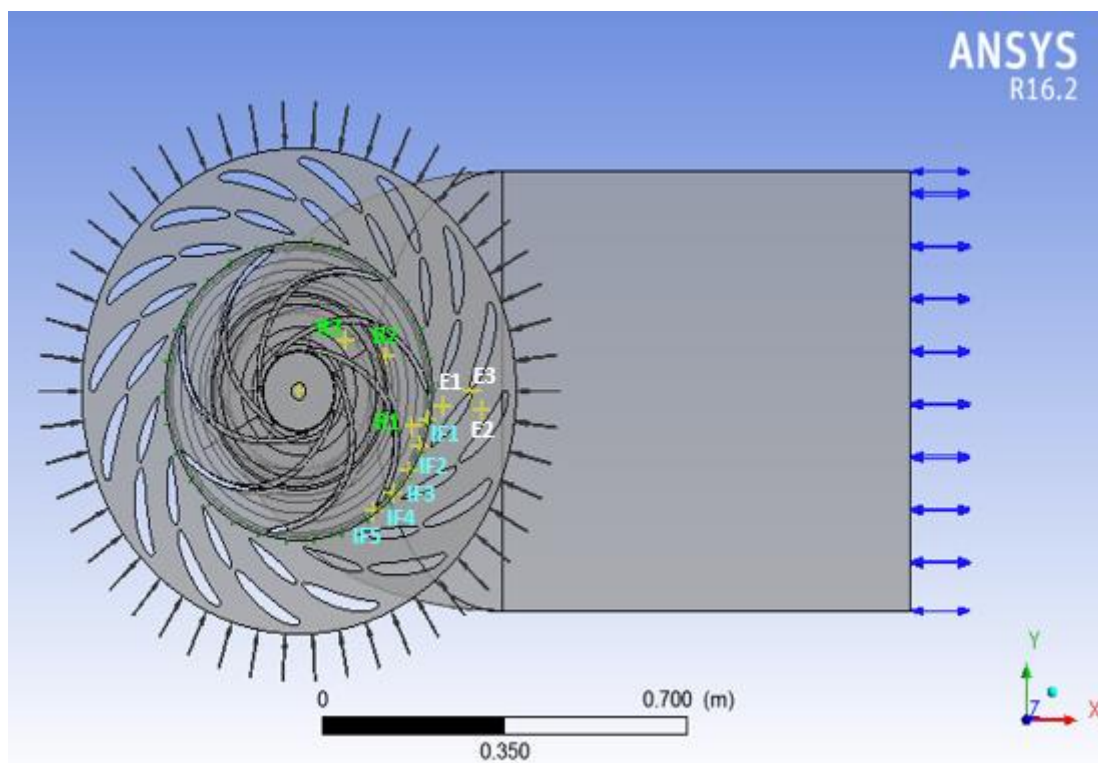


Figura 69. Vista en el pla Z0 dels monitors. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A la Figura 70 s'aprecien els monitors del tub d'aspiració i, encerclats en negre, els nous monitors afegits a la simulació de tots els àleps malmesos.

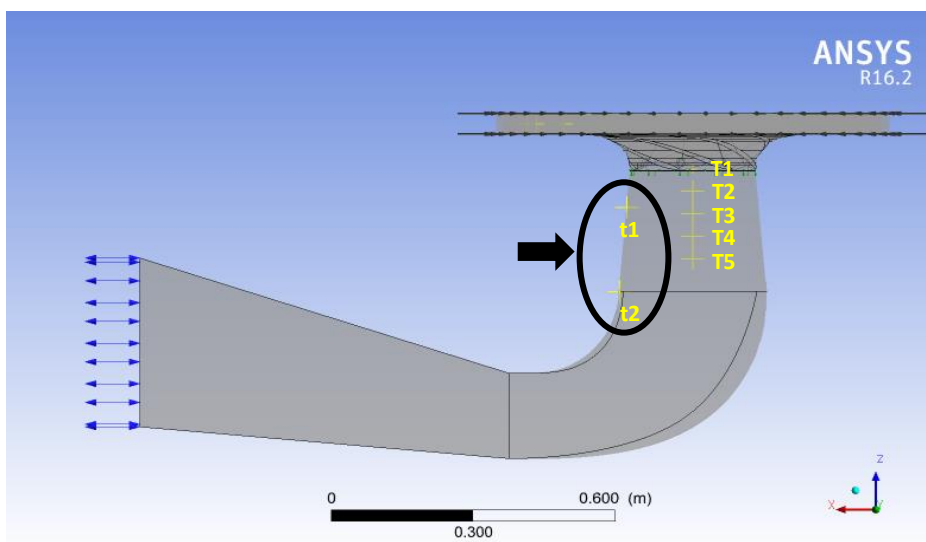


Figura 70. Vista en el pla Y0 del monitors al tub. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

4. Resultats de la simulació

Un cop han convergit les simulacions, es guarden totes les dades extretes pel seu posterior anàlisi. A continuació es procedeix a mostrar els gràfics, mapes de contorns, mapes de vectors, etc. L'eina que permet poder visualitzar tota aquesta informació, al CFX, s'anomena *CFD-Post*, ubicada a la pestanya *Results* de l'Ansys CFX (Figura 71).

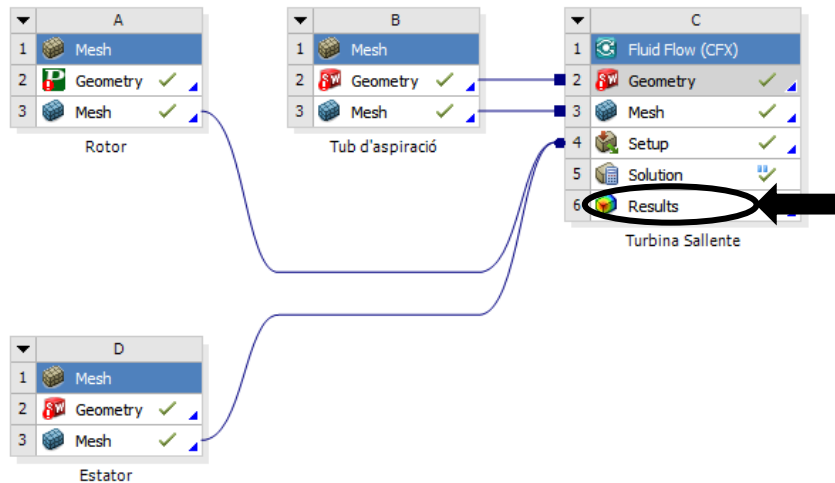


Figura 71. Results de la simulació. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

4.1. Resultats gràfics al *CFD-Post*

En aquest apartat es mostren els resultats gràfics extrets de la simulació. Primerament es presenta una visió general de la turbina i, posteriorment, una comparativa entre les tres geometries del rodet: la geometria original, la geometria amb un àlep malmès i la que conté tots els àleps danyats.

4.1.1. Visió general de la turbina Francis

Per tal d'obtenir una visió general del comportament del fluid a través de la turbina es creen els contorns de pressió i velocitat de la geometria original, ja que les variacions que comporten els canvis en el rodet són inapreciables en la vista general. Els mapes de contorn indiquen com varia cada propietat de manera visual al llarg de la geometria on s'apliquen.

CONTORNS DE PRESSIONS:

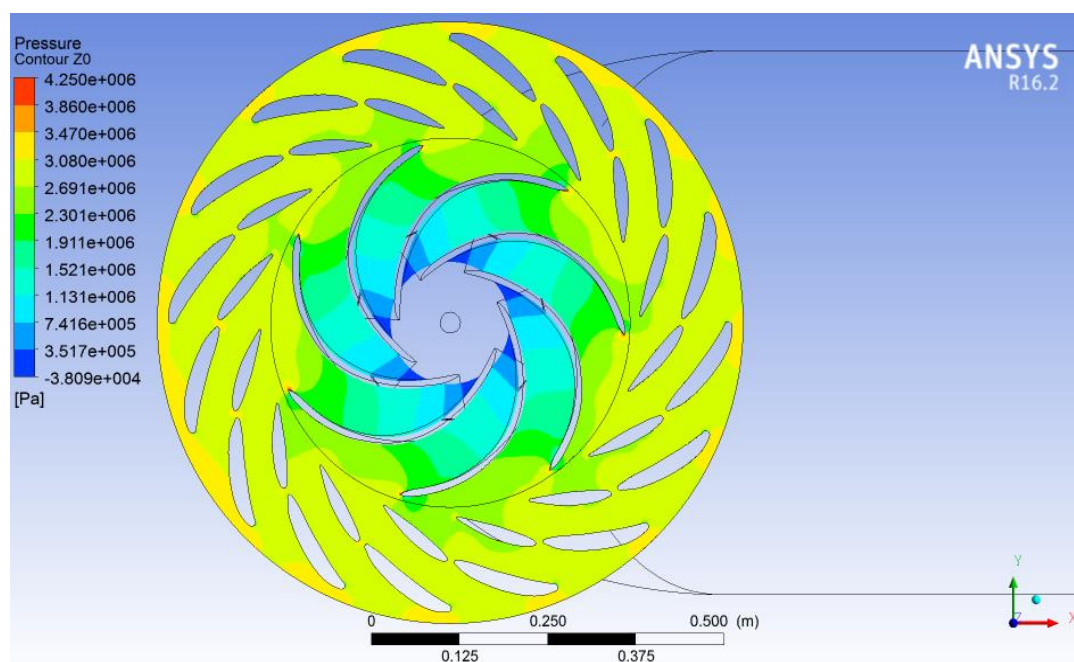


Figura 72. Pressions de l'estator i el rotor (pla Z0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

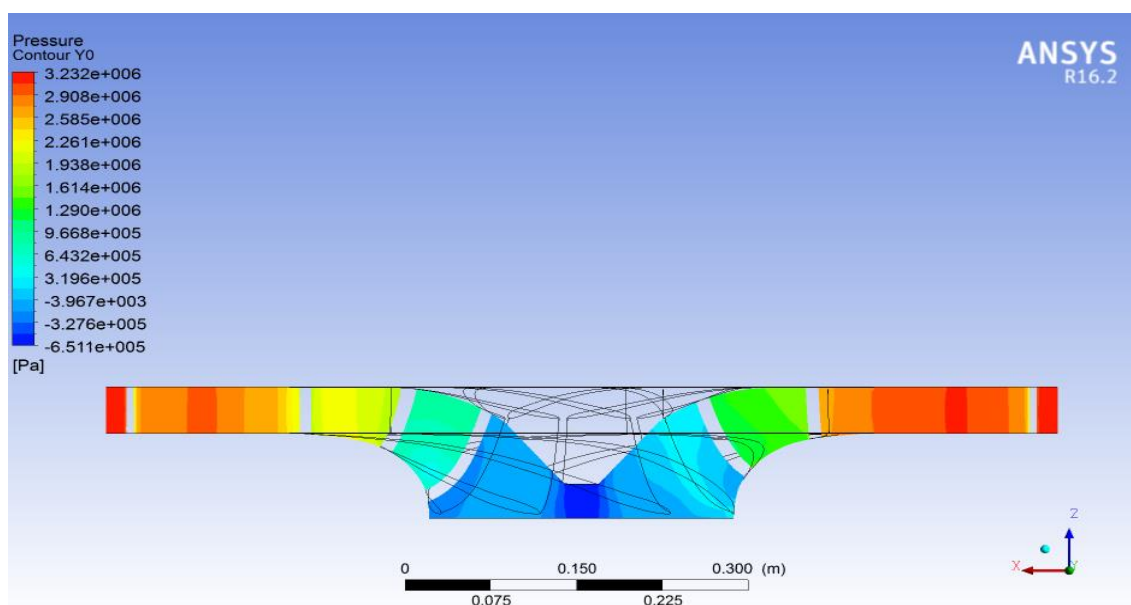


Figura 73. Pressions de l'estator i el rotor (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

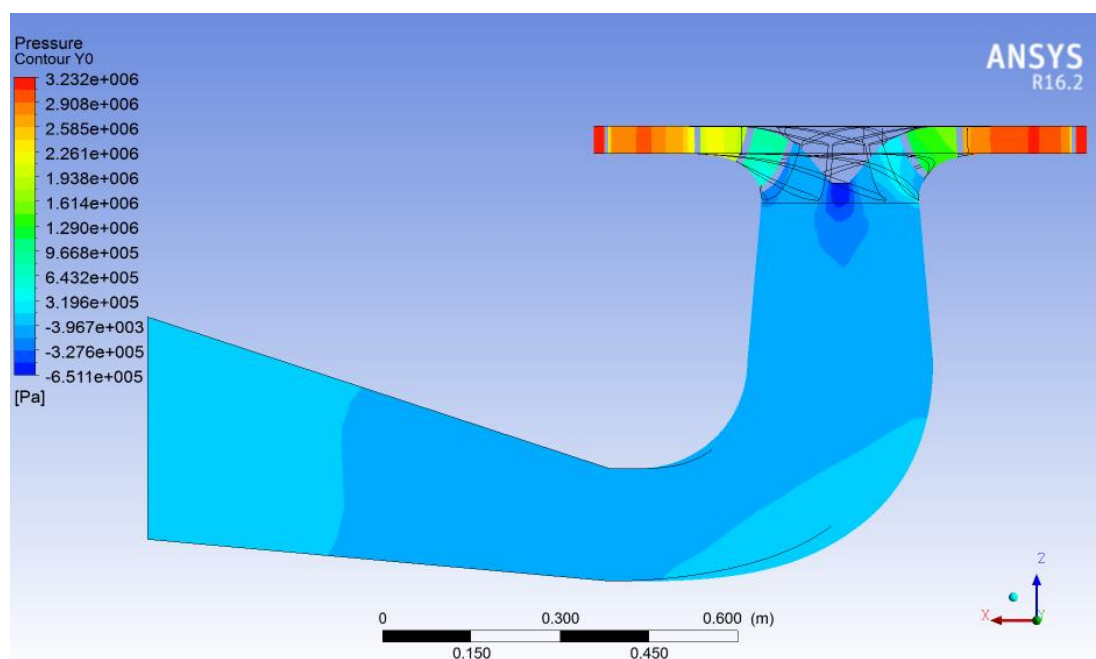


Figura 74. Pressions de l'estator, rotor i tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Pel que fa a les pressions generals que es poden observar a la turbina, es pot dir que la part que està sotmesa a majors pressions es localitza a la zona de transició entre l'estator i el rodet. A la Figura 73 i Figura 74 es poden apreciar aquestes zones que, com a conseqüència de les altes pressions, són les zones de major desgast. A la Figura 72 s'aprecia una variació de pressió més gradual al presentar-se els resultats des del pla Z0. D'altra banda s'observa que les zones amb les pressions més baixes corresponen a la sortida del rotor i a l'entrada del tub d'aspiració. Si bé s'acostumen a prendre les zones de major pressions com les més crítiques, quan aquestes prenen valors molt baixos poden ocasionar problemes com l'erosió produïda per la cavitació. Més endavant s'analitza aquest fenomen de manera més detallada.

CONTORNS DE VELOCITAT:

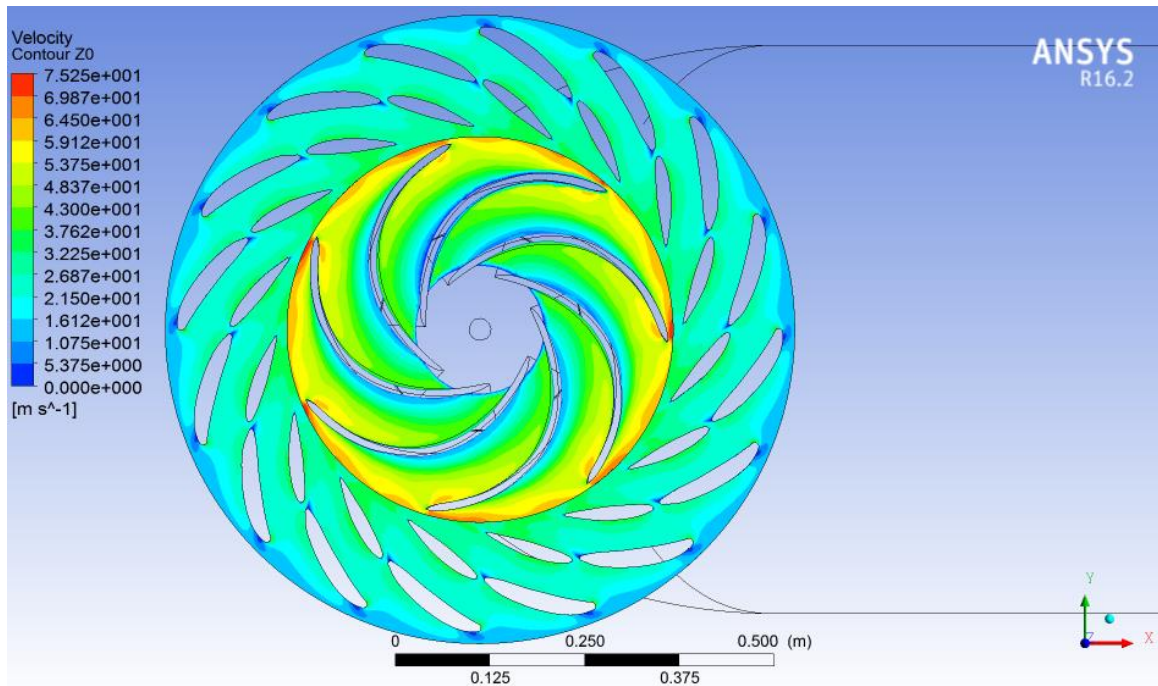


Figura 75. Velocitats a l'estator i al rotor (pla Z0). -Font: *Elaboració pròpia amb Ansys CFX.*

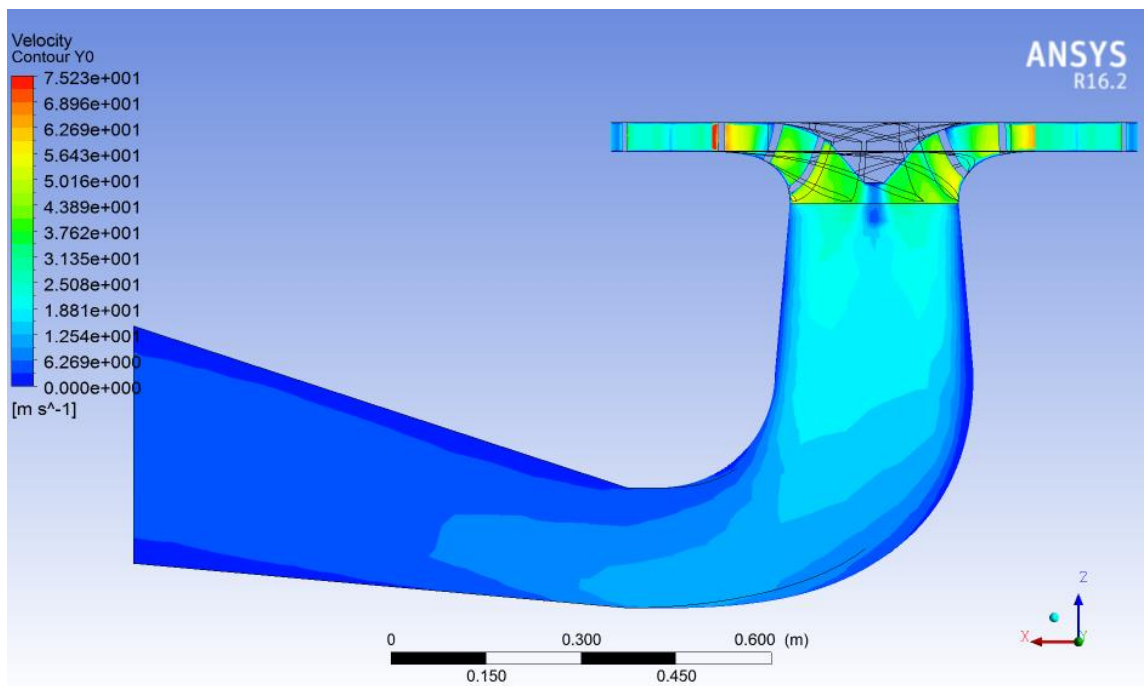


Figura 76. Velocitats a l'estator, rotor i al tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

En referència a les velocitats, es pot observar que les zones de major i menor velocitat coincideixen amb les de major i menor pressió.

Si s'observa la Figura 75, es pot veure com a la punta dels àleps a l'entrada del rotor s'experimenten els majors pics de velocitat, els quals poden ser deguts a algun fenomen no desitjat a les turbines. A mesura que el fluid flueix per la turbina va perdent velocitat, ja que la majoria d'energia cinètica que portava ha estat emprada per produir el gir del rodet (veure Figura 76). Quan el fluid arriba al tub d'aspiració, aquest flueix amb velocitats considerablement baixes, fins al punt que a les parets del tub són pràcticament nul·les degut a la força de fricció.

4.1.1.1. Línies de corrent

Les línies de corrent ens indiquen el transcurs general del fluid al recórrer la turbina. A més de indicar-nos el sentit, ens indiquen la mateixa informació que els contorns de velocitats però en un format més visual.

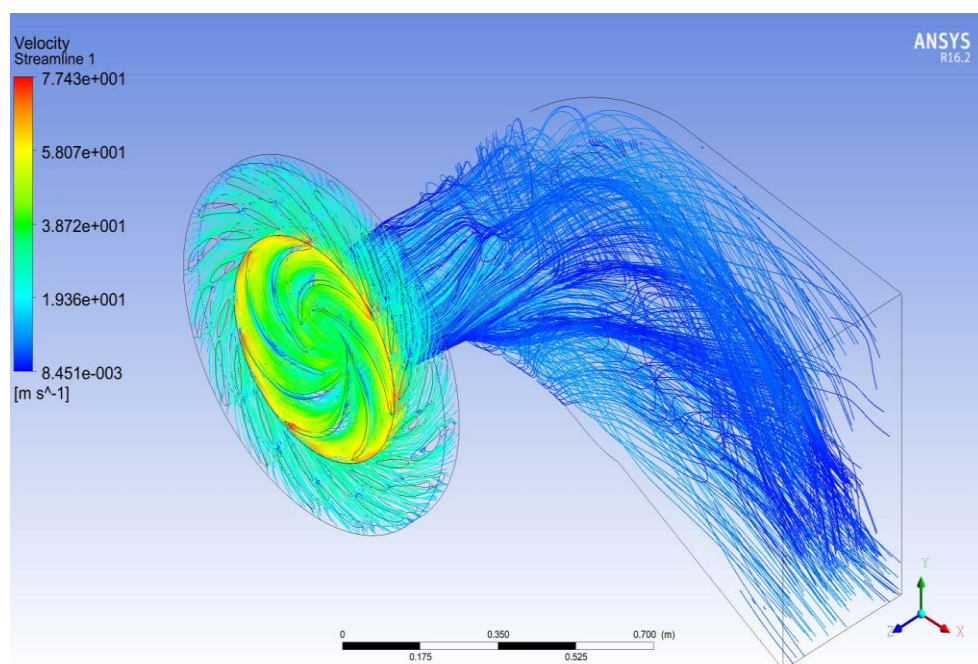


Figura 77. Línies de corrent en vista isomètrica. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

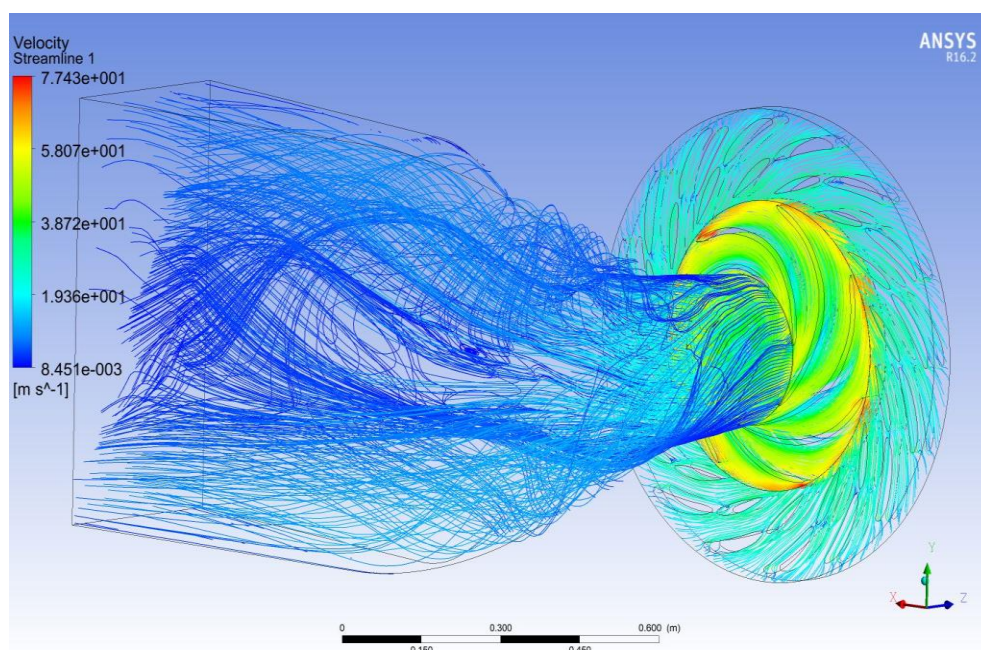


Figura 78. Línies de corrent en vista posterior. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

4.1.2. Anàlisi del rodet

Es procedeix a analitzar en detall el comportament del fluid al rotor, comparant les tres geometries de les quals es disposa per tal d'observar si es produeixen variacions significatives entre elles. Cal comentar que els grups d'imatges de la comparativa que es presenta a continuació comparteixen la mateixa llegenda. L'ordre seguit al mostrar el trio d'imatges es defineix d'ara en endavant com: geometria original (1), un àlep trencat (2) i tots els àleps trencats (3).

4.1.2.1. Contorns de pressió

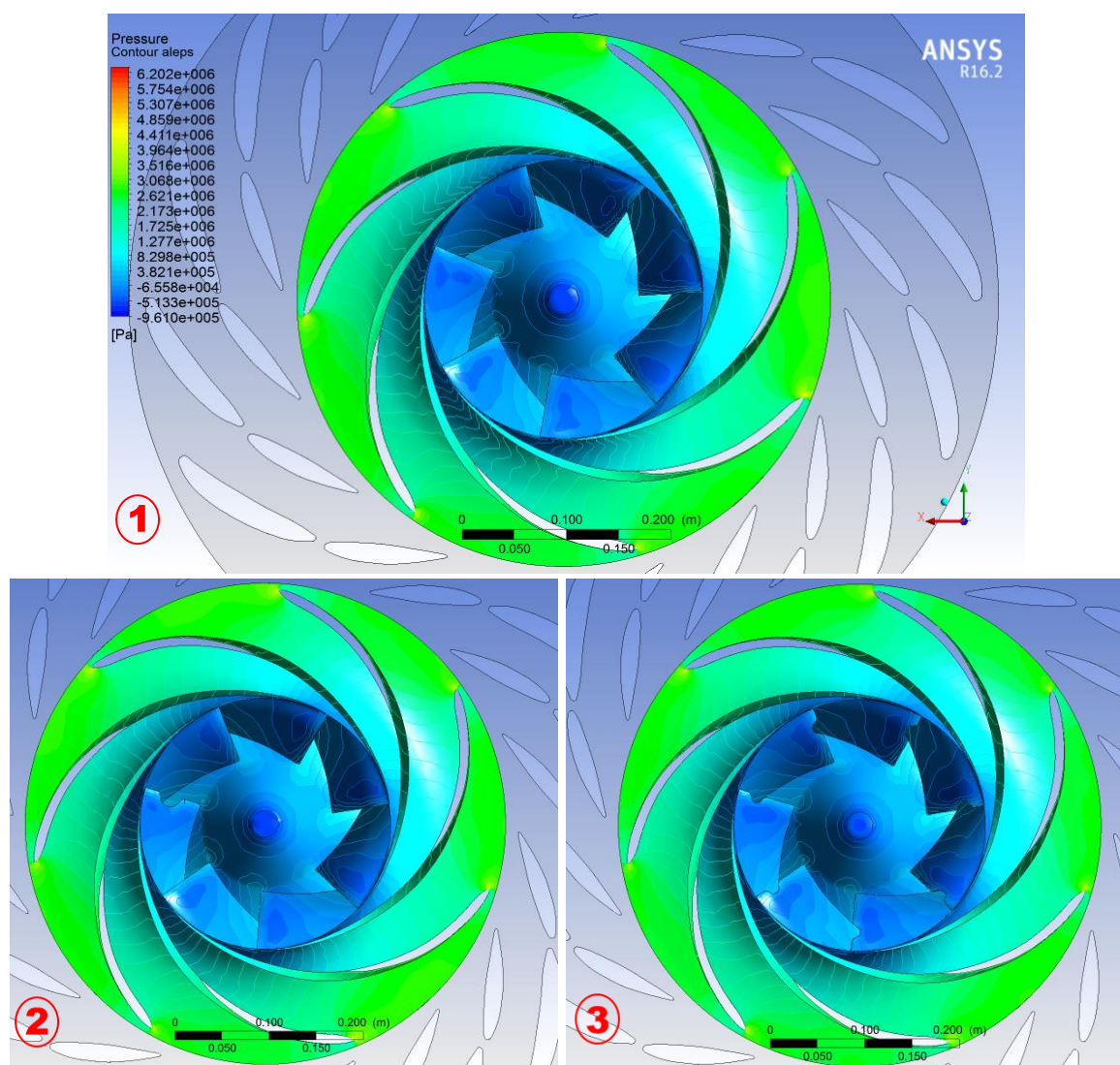


Figura 79. Contorn de pressions de les tres simulacions a les parets dels àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A la Figura 79, es poden observar les pressions que s'originen a les parets dels àleps i també del rotor. Es pot apreciar que la pressió a l'entrada del rotor adopta valors relativament alts i, a mesura que el fluid avança pels àleps, la pressió va disminuint significativament. Això és degut a la geometria en forma

de tovera del rotor i a la transformació d'energia cinètica del fluid en energia mecànica associada a la rotació. També, s'observa com a les puntes dels àleps, a l'entrada del rotor, s'originen els valors més alts de pressió del rodet, fet que reafirma les observacions de la visió general. El fet que hi hagi forats als àleps del rotor senzillament crea un patró diferent en la distribució de pressions, però els valors es mantenen similars.

Per tal de poder analitzar amb més precisió el que passa a la zona dels àleps trencats, es realitza una secció del pla Z0 que talla a l'altura dels àleps amb danys, aproximadament a la meitat del forat.

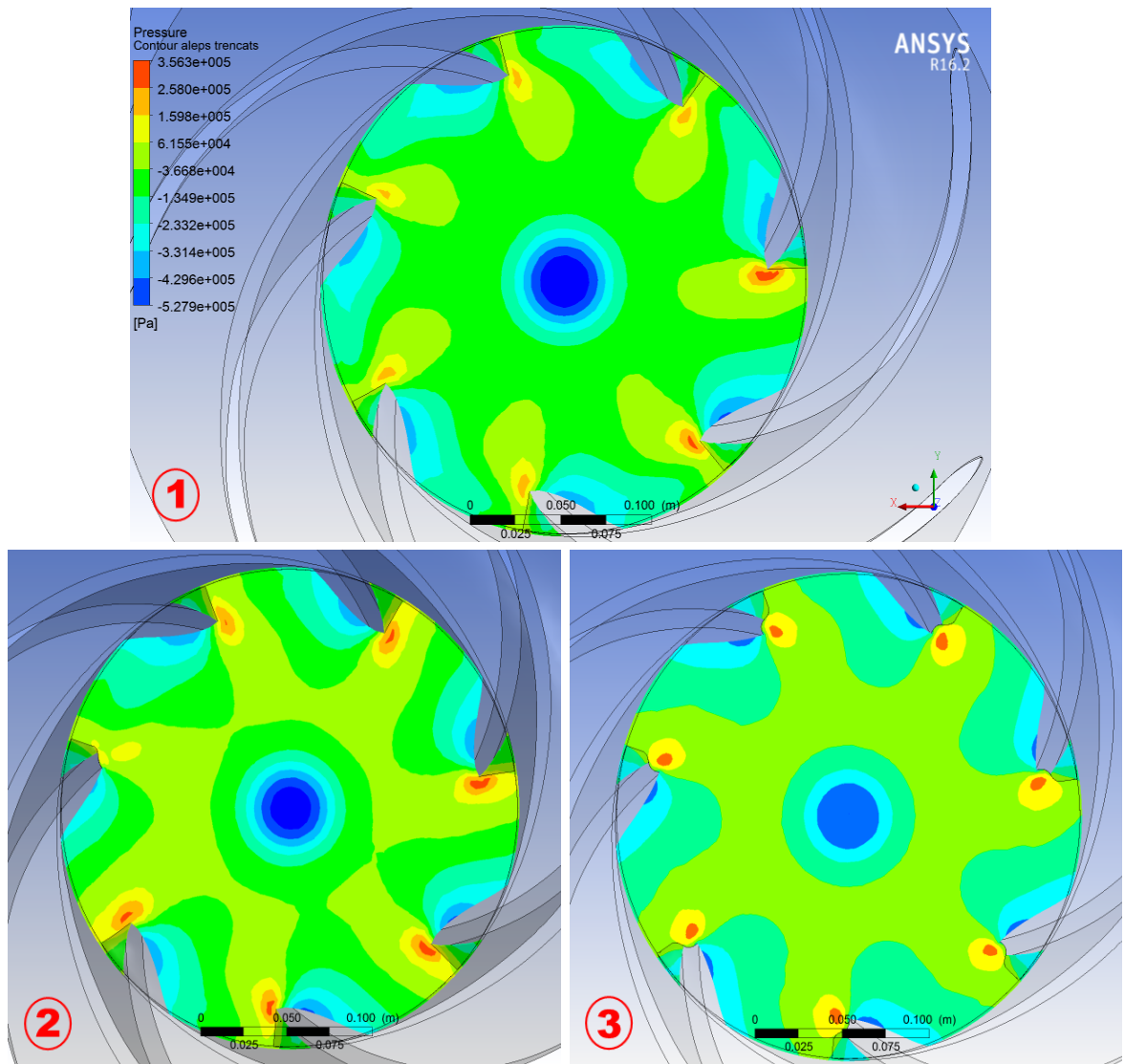


Figura 80. Pressions al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A la Figura 80 es pot observar que, a totes les geometries, les zones de menor pressió es troben al centre del rotor i a les parets interiors dels àleps. El punt de pressió més baix però, té lloc al punt central del rodet, degut a que s'hi origina un vòrtex considerable produït per la geometria cònica del propi rotor. Pel que fa a les zones de major pressió, es donen a la punta dels àleps i a la cara contrària de l'àlep on flueix el fluid (parets exteriors dels àleps).

Cal mencionar també que, a la geometria (2), s'observa un àlep que destaca per tenir valors de pressió menors a la resta. Aquest coincideix amb l'únic àlep malmès d'aquella geometria. Es creu que aquesta disminució pot ser deguda a un augment de la velocitat en la direcció Z i, senzillament destaca respecte els altres perquè en ser l'únic àlep trencat de la geometria en qüestió, provoca un patró no uniforme.

En general s'observa com l'existència dels forats provoca pressions més altes que en la geometria original, creant també patrons diferents. Per veure en detall els contorns de pressió a la sortida del rodet veure Annex1.

4.1.2.2. Contorns de velocitat

De la mateixa manera que amb els contorns de pressions, es procedeix a estudiar la mateixa secció del pla Z0 anterior per tal d'analitzar el detall dels àleps.

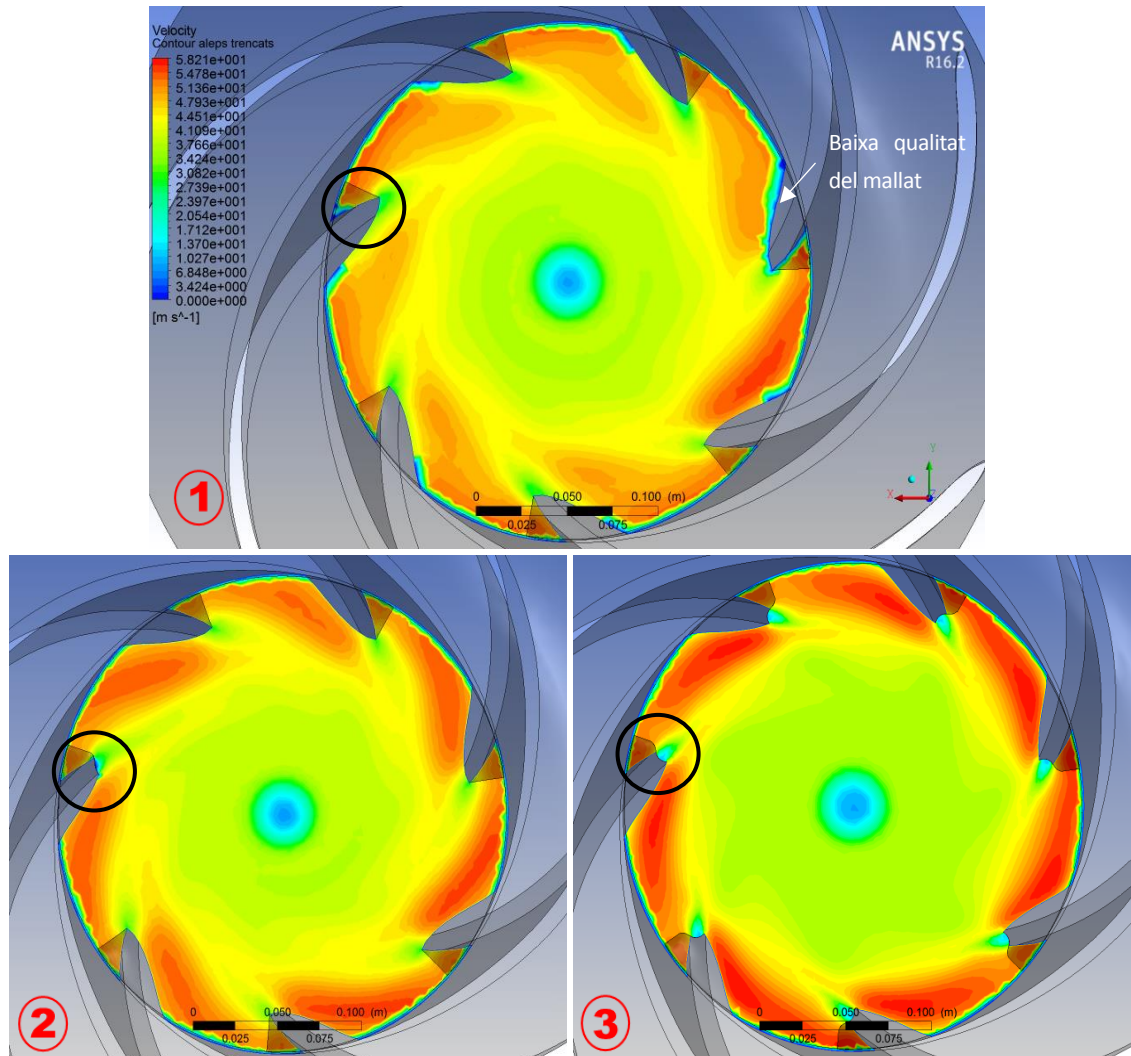


Figura 81. Velocitats al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Tal com es pot observar a la Figura 81, les zones on s'aprecien majors velocitats són les cares interiors dels àleps, fet que resulta comprensible, ja que és per on circula la major part del fluid. Cal fixar-se però, que a l'apartat 2.3.5. s'ha comprovat que aquesta zona coincideix amb la de menors pressions. Per tant, pot deduir-se que aquest comportament és degut al principi de Bernoulli, el qual comporta baixes pressions a les zones de majors velocitats.

Si s'observa la Figura 81 amb deteniment, es pot apreciar un petit descens de la velocitat del fluid al llarg de les parets dels àleps, el qual és ocasionat pel despreniment de la capa límit i pel fregament del fluid amb les parets. Cal mencionar però, que aquest fet és més acusat a la geometria (1) que no pas a la resta de geometries degut a un possible mallat de baixa qualitat. Per tant, aquesta variació no resulta significativa per al present projecte.

D'altra banda, destaca la variació significativa de velocitat que es dona a la punta dels àleps en les 3 geometries i que podria arribar a desencadenar turbulències. Per a poder observar amb més detall què passa en aquesta zona, s'ha optat per a realitzar un zoom de les àrees marcades a la Figura 81.

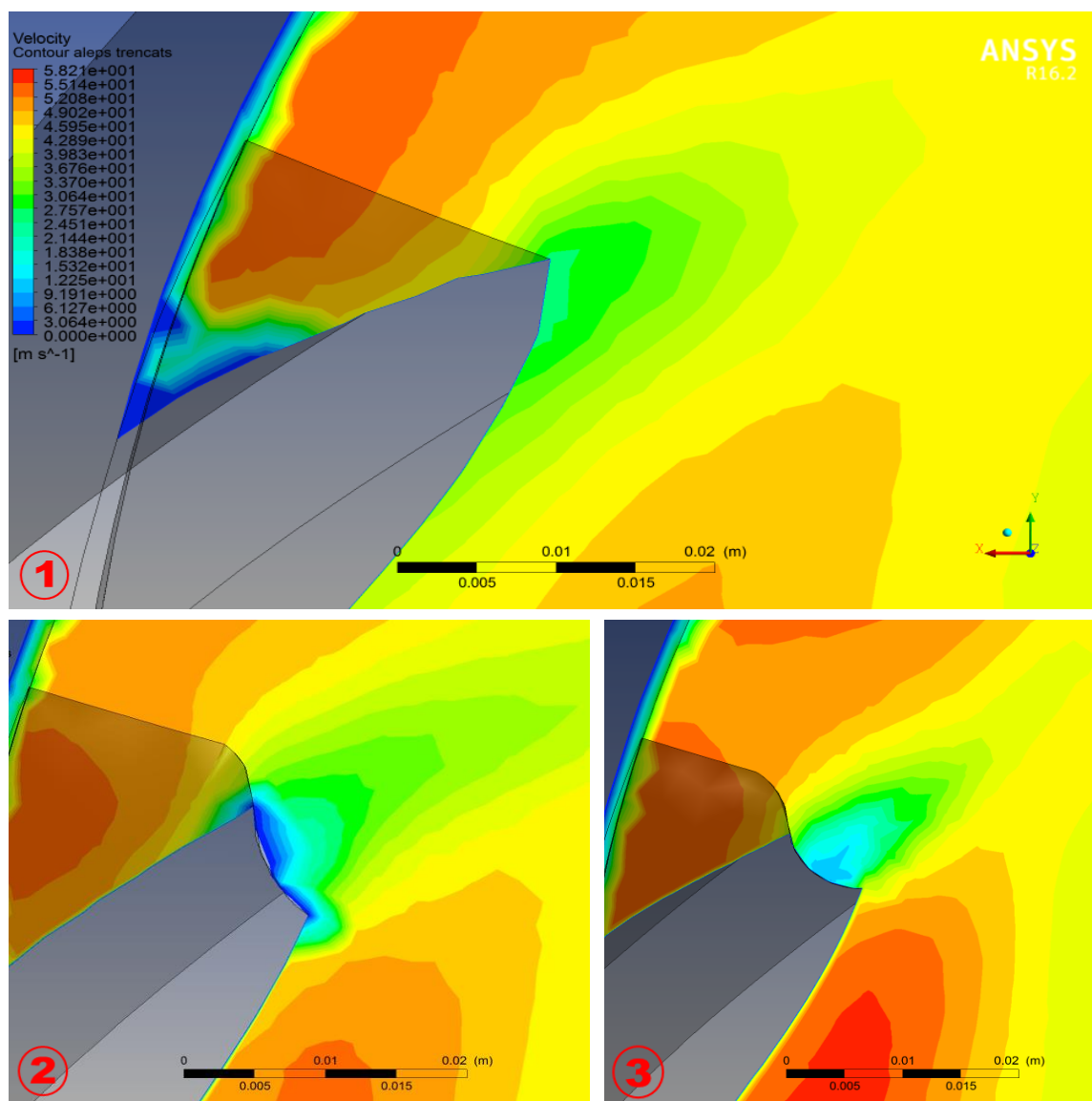


Figura 82. Detall velocitat contorn àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Com es pot observar a la Figura 82, les dues geometries que presenten forats (2,3) pateixen un descens dràstic de la velocitat a la zona afectada dels àleps, si es compara amb la geometria del rodet original. A la geometria (3) es pot veure com aquesta variació de velocitat és més gradual respecte la geometria (2), fet que pot ser degut a que els forats en cadascun dels dos casos són lleugerament diferents.

Per veure en detall els contorns de velocitat a la sortida del rodet veure Annex1.

4.1.2.3. Contorns de turbulència

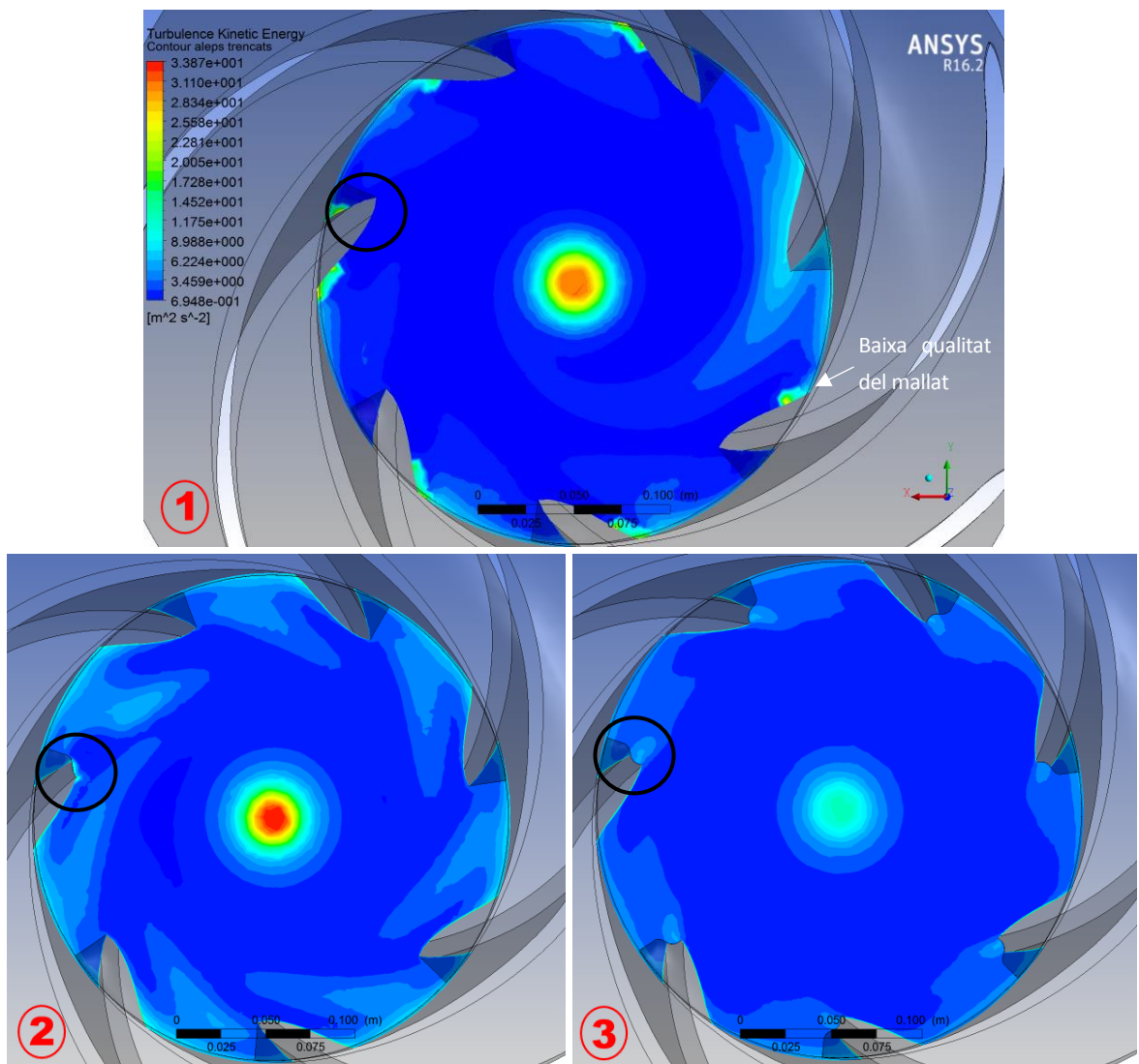


Figura 83. Turbulència relativa a l'energia cinètica del fluid al pla altura àleps danyats. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Com a conseqüència de les variacions de velocitat, s'ocasionen una sèrie de turbulències al pla on es localitzen els danys als àleps (Figura 83). A simple vista, es pot veure com al centre del rodet és on s'originen les turbulències més notòries. Això és degut a un gran vòrtex que apareix com a conseqüència de la geometria cònica del rotor i la seva constant rotació.

Si es comparen les 3 geometries, s'observa que la de major turbulència és la geometria (2), corresponent a un àlep trencat. Aquest fet resulta lògic doncs en tenir un àlep malmès, el fluid es distribueix de forma menys uniforme que a la resta de geometries que tenen els àleps iguals entre ells, desencadenant turbulències que són repartides per tot el rodet.

D'altra banda, la geometria (3) presenta unes turbulències majors que les de la geometria (1) degut al mal estat dels àleps, tot i que aquestes es reparteixen d'una manera suau si es compara amb la geometria (2).

Per a poder apreciar millor les turbulències que s'originen als forats dels àleps, s'ha procedit, de manera anàloga a la velocitat, a realitzar un zoom a la zona afectada.

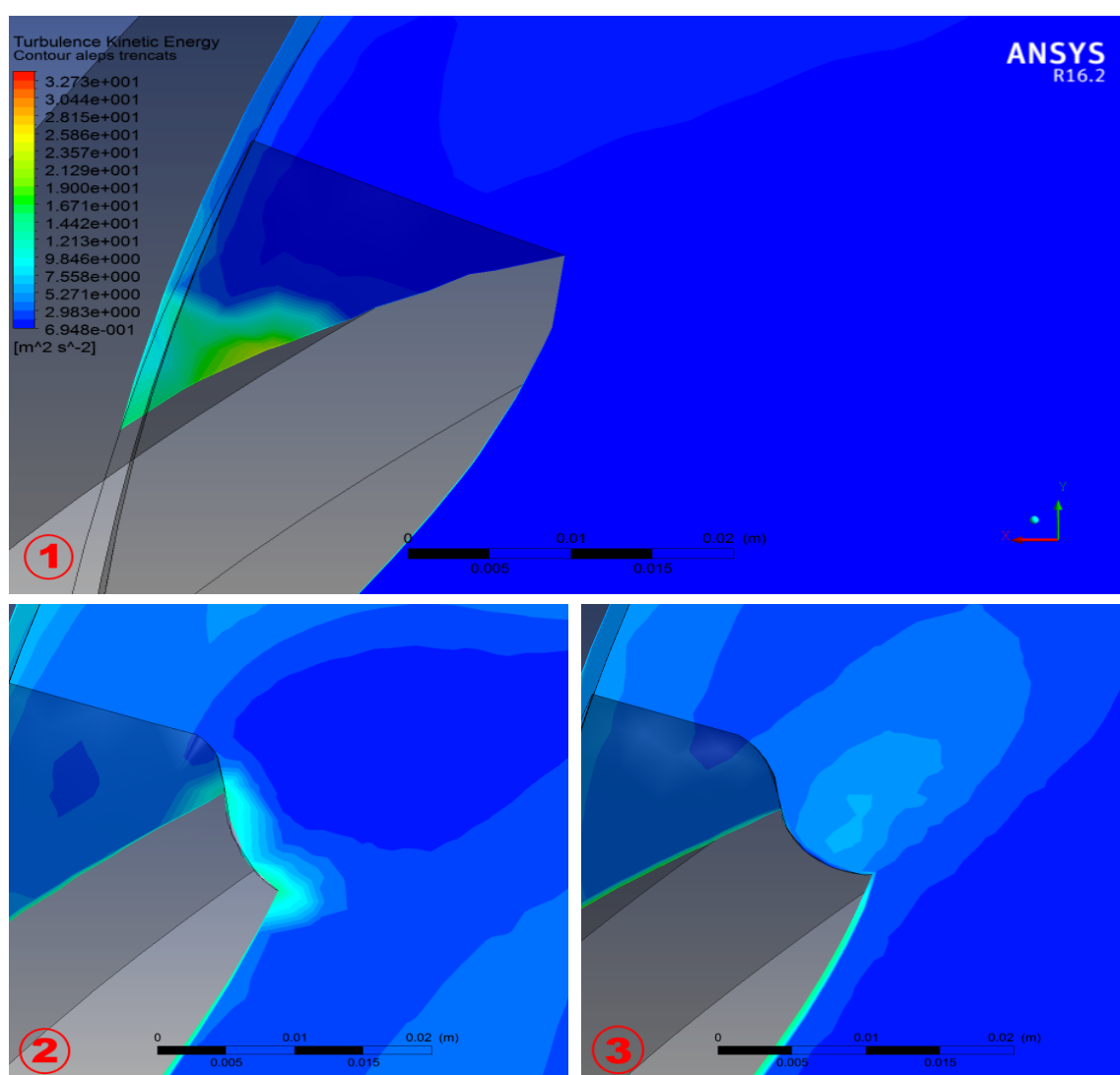


Figura 84. Detall turbulència contorn àleps. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

La Figura 84 mostra el detall de les turbulències a la zona dels àleps on hi ha els forats. Com es pot veure, a la geometria (1), les turbulències són inapreciables a la punta dels àleps. En canvi, a les geometries malmeses (2,3), les turbulències associades als forats es fan patents. A la geometria (2), les turbulències són majors que a la geometria 3. Aquesta variació és també deguda a la diferència en les dimensions dels forats que s'ha mencionat anteriorment.

A més a més, si s'observa el contorn dels àleps a la zona de la paret, sobretot en les geometries malmeses, es pot veure com hi ha petites turbulències ocasionades pel fregament del fluid amb la paret i pel despreniment de la capa límit.

Per veure en detall els contorns de turbulència a la sortida del rodet veure Annex1.

4.1.2.4. Vectors

Els resultats gràfics basats en vectors indiquen la direcció i la intensitat de la propietat que s'està analitzant, així que s'ha optat per mostrar els vectors velocitat i les forces que s'ocasionen al rodet de la turbina. La geometria en la qual es presenten tals resultats consisteix en la que conté tot els àleps trencats, ja que no s'aprecia variació en els vectors obtinguts de cada propietat en les 3 geometries.

4.1.2.4.1 Vectors velocitat

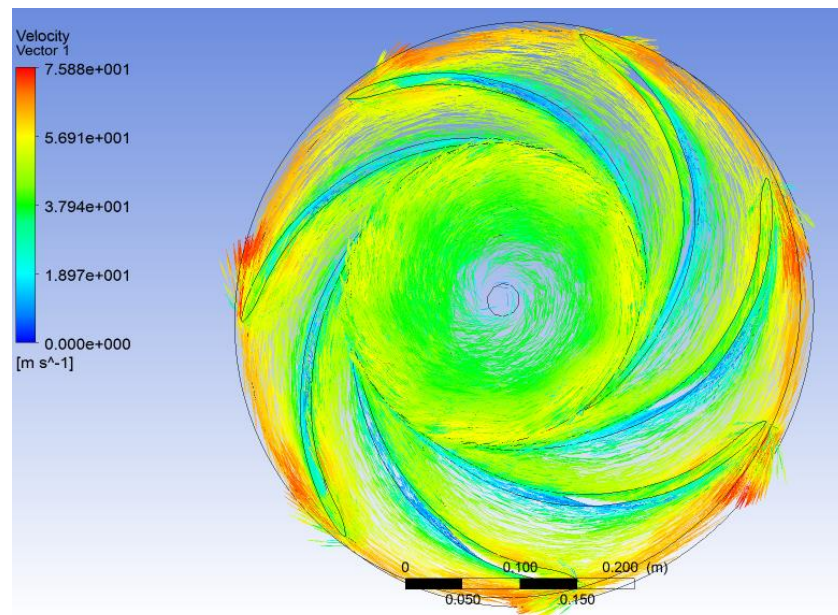


Figura 85. Vectors de velocitat al rotor. -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Com es pot veure a la Figura 85, les velocitats més altes es produeixen a la punta dels àleps a l'entrada del rodet. Aquesta informació ja s'ha pogut apreciar en apartats anteriors però en diferent format. Aquets pics de velocitat són deguts a la rotació del rotor i la interacció rotor-estator. També hi pot influir l'aparició de vòrtex que s'ocasionen pel gir constant del rodet. La velocitat va disminuint al recórrer els àleps del rotor per la força de fricció i, finalment, guanya part de la velocitat al sortir cap al tub d'aspiració.

4.1.2.4.2 Forces

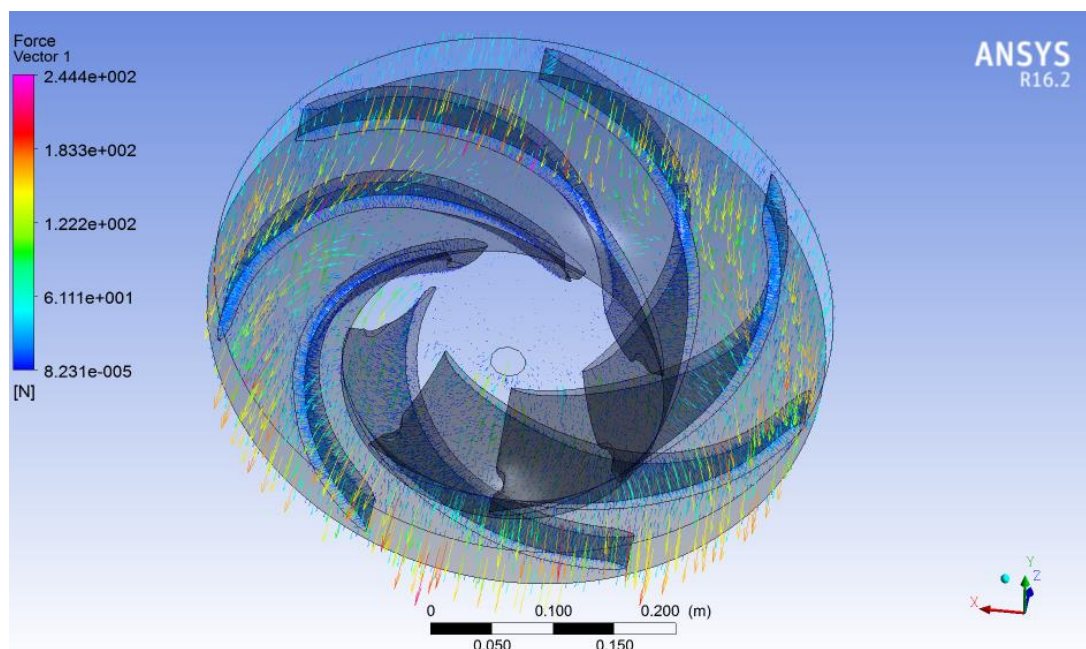


Figura 86. Vectors de força al rotor . -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

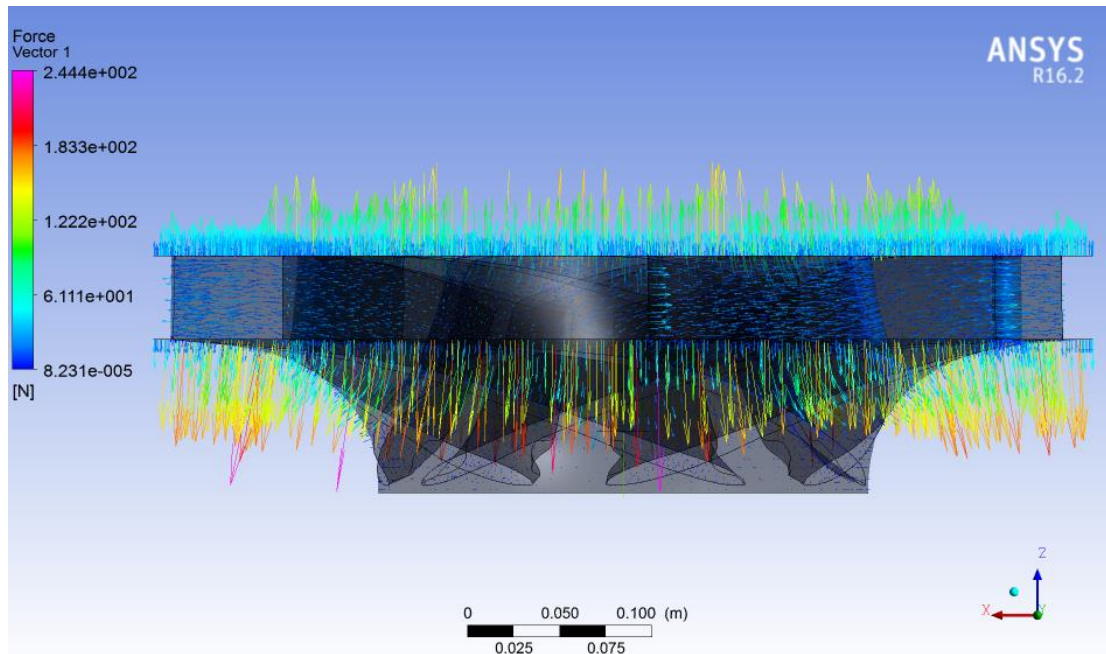


Figura 87. Vector de força al rotor (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

La Figura 86 i la Figura 87 mostren les forces a les parets del rodet. Tal com es pot observar, les forces de major valor es troben a les zones de l'entrada del fluid al rotor, fet que resulta lògic en coincidir amb les zones on el fluid col·lisiona amb el rodet per provocar-li el gir i correspon zona de majors pressions. A la Figura 86 es pot veure que, a conseqüència del gir del rotor, les forces no tenen únicament una component tangencial a les superfícies i, per tant, algunes d'aquestes forces són resultat de les forces centrífugues associades a la rotació.

Finalment, es pot observar que, on es localitzen les forces més altes és a la cara inferior del rotor en la Figura 87. Això es deu a l'efecte de la gravetat, ja que en totes les simulacions s'ha tingut en compte.

4.1.2.5. Estudi de la cavitació

Un dels fenòmens més indesitjats que poden sorgir a les turbomàquines és la cavitació, del qual se n'ha parlat en profunditat a l'apartat 2.5.2. Per tant, resulta important realitzar-ne un anàlisi per veure si es produeix cavitació en alguna zona.

Cal recordar que les dues geometries corresponents al rodet amb un àlep trencat i al rodet amb tots els àleps trencats parteixen de la suposició que aquests danys han estat causats per la cavitació de bombolles. Per tant, es procedeix a comprovar si realment es podria originar aquest fenomen.

Per tal d'efectuar aquest estudi, s'utilitza l'eina *Isosurface* del *CFD-Post*. Una *Isosurface* és una superfície tridimensional la qual té una variable particular que pren un valor constant. En aquest cas, com es tracta d'analitzar la cavitació, la variable constant correspon a la pressió.

Aquest valor de la pressió es calcula a partir de la pressió a la qual tindria lloc la cavitació. Aquesta, depèn de la pressió atmosfèrica i de la pressió de saturació de l'aigua a una certa temperatura. La pressió de la *Isosurface* es calcula de la següent manera:

Inicialment, cal trobar la pressió atmosfèrica a l'altitud on es troba la turbina. La central de Sallente es troba a una altitud de 1765 m respecte el nivell del mar. Amb aquesta altitud es procedeix a calcular la pressió atmosfèrica, on P_{atm} és la pressió en mil·libars i H l'altitud de la central. L'equació (30) relaciona la pressió atmosfèrica i l'altitud segons l'atmosfera estàndard internacional (ISA).

$$P_{atm}(mbar) = 1013,25 \cdot (1 - 0,0000225577 \cdot H)^{5,2559} \rightarrow \quad (30)$$

$$\rightarrow P_{atm} = 818,422 \text{ mbar } (81842,21 \text{ Pa})$$

Un cop calculada la pressió atmosfèrica a l'altitud de la central, cal trobar, a les taules de les propietats de l'aigua, la pressió de saturació (líquid-vapor) a la temperatura a la que es troba. Aquesta temperatura és de 25°C.

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp, °C	Presión bar	Volumen específico m ³ / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg K	
		Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor vaporiz,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533

Figura 88. Taula de les propietats de l'aigua saturada en funció de la temperatura. -Font: Recuperat de www.ocw.unican.es.

Com es pot veure a la Figura 88, per a una temperatura de 25°C, es correspon una pressió de saturació de 0,03169 bar (3169 Pa). Llavors, la pressió de la *Isosurface* es calcula com:

$$P_{abs}(Isosurface) = P_{atm} - P_{sat} = 81842,21 - 3169 = 78673,21 \text{ Pa} \quad (31)$$

S'introdueix el valor de la *Isosurface* a **78673,21 Pa** i es llença el càlcul.

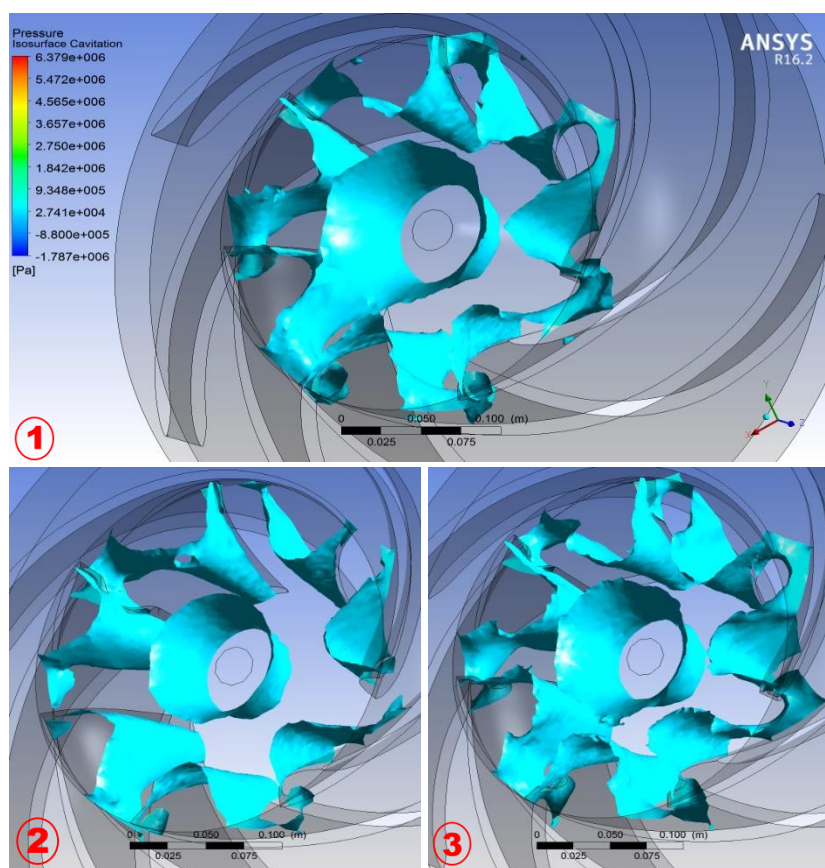


Figura 89. Cavitació al rotor (vista isomètrica). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

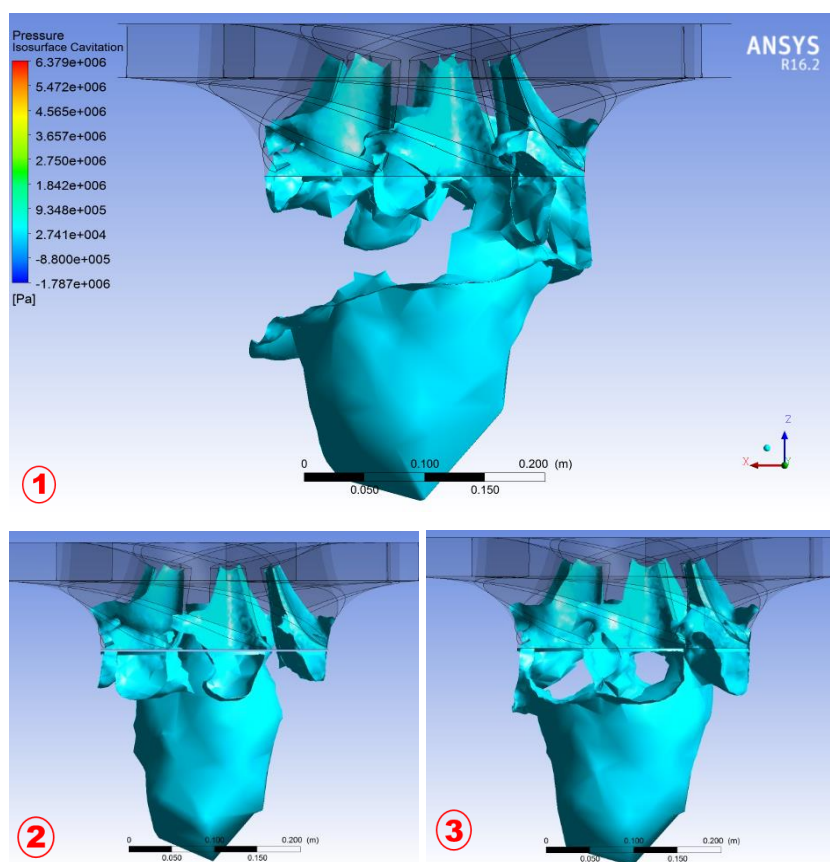


Figura 90. Cavitació al rotor i al tub d'aspiració (pla Y0). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

Com es pot apreciar a la Figura 89 i Figura 90, amb les condicions donades, es produeix cavitació a la sortida del rotor. En totes tres geometries s'observa com la cavitació comença a produir-se des de la part inferior de l'interior dels àleps i creix en direcció al tub d'aspiració. És pot apreciar que apareix cavitació als àleps del rodet i, sobretot, a l'entrada del tub d'aspiració. Aquesta cavitació s'anomena cavitació de torxa (Figura 25). Per tant, veient els resultats, es corrobora que, on s'han recreat uns possibles danys produïts per la cavitació, efectivament apareix el fenomen quan el fluid és conduït cap a l'exterior del rodet.

El fet que siguin tres geometries diferents, pel que fa a la cavitació, només afecta en la forma en que es desenvolupen les “bombolles”. És a dir, a la turbina s'estarien ocasionen uns danys que en poc temps podria donar problemes majors tant al rodet de la turbina com a l'eix, ja que aquest tipus de cavitació produeix un nivell de vibracions força perjudicial.

4.2. Anàlisi dels monitors

En aquest apartat, es procedeix a mostrar i comparar els monitors situats en totes tres geometries. En aquest anàlisi es representen les pressions, forces i parell motor respecte el temps. Amb l'ajuda d'una funció ja programada al software *Scilab*, la qual ha estat facilitada pel tutor del projecte, s'aconsegueix transformar les senyals de temps dels monitors a senyals de freqüència per, així, representar aquelles que resulten més significatives.

A partir de la informació proporcionada per aquestes freqüències, es poden identificar certs fenòmens que s'originen a l'interior de la turbina. L'exemple més clar i significatiu és a l'hora d'identificar la interacció rotor-estator (RSI). Com ja s'ha comentat al capítol 2.5.1, aquest fenomen es produeix degut a que el rodet està en constant rotació mentre que l'estator es manté estàtic, per tant, hi ha instants de temps en què els àleps del rotor passen molt a prop dels àleps de l'estator, creant pics de pressió que generen vibracions.

Primerament, es calculen les freqüències de manera teòrica per, posteriorment, comparar-les amb els resultats del *Scilab*.

Pel que fa a la freqüència de gir del rodet, es calcula a partir de l'equació (32):

$$F_{rodet} = \frac{n_{rodet} (rpm)}{60 (s)} = \frac{3435}{60} = 57,250 \text{ Hz} \quad (32)$$

A continuació es procedeix a calcular la freqüència de pulsació del rodet, on Z_R són els àleps:

$$F_{p,rodet} = n \cdot Z_R \cdot F_{rodet} = 7 \cdot 57,250 = 400,750 \text{ Hz} \quad (33)$$

Seguint la mateixa línia, es calcula anàlogament la freqüència de pulsació de l'estator associada al gir del rodet, on Z_D correspon als àleps de l'estator:

$$F_{p,estator} = n \cdot Z_D \cdot F_{rodet} = 16 \cdot 57,250 = 916 \text{ Hz} \quad (34)$$

Finalment, per obtenir els harmònics de les freqüències de pulsació del rotor i de l'estator, multipliquem 1,2,3,4,5... per la freqüència de pulsació del rodet o bé de l'estator, per trobar tantes freqüències com es necessitin. A la Taula 9 es mostren set harmònics del rodet i de l'estator que identifiquen el fenomen d'RSI. A l'hora de buscar les freqüències obtingudes en cada monitor, s'ha de tenir en compte que quan el monitor està situat o referit a l'estator, les freqüències majors han de coincidir amb les del rodet ($F_{p,rodet}$), ja que estarà interaccionant un àlep estàtic de l'estator amb set àleps del rodet per cada volta. Així mateix, quan el monitor està situat o referit al rotor, s'han d'identificar les freqüències de l'estator ($F_{p,estator}$), ja que estarà interaccionant un àlep estàtic del rodet versus setze àleps de l'estator per cada gir.

n	1	2	3	4	5	6	7
$F_{p,rodet} \text{ (Hz)}$	400,75	801,50	1202,25	1603,00	2003,75	2404,50	2805,25
$F_{p,estator} \text{ (Hz)}$	916,00	1832,00	2748,00	3664,00	4580,00	5496,00	6412,00

Taula 9. Harmònics per la identificació del RSI. -Font: Elaboració pròpia.

Un cop obtingudes les freqüències per a la identificació de l'RSI, es procedeix a presentar els resultats obtinguts a partir de l'SciLab, analitzant cada grup de monitors i graficant la comparativa dels tres casos d'estudi: geometria original, geometria amb un àlep malmès i geometria amb tots els àleps danyats. Així mateix, es mostren les freqüències obtingudes a cadascun dels casos.

4.2.1. Monitors de *drag* i *lift*

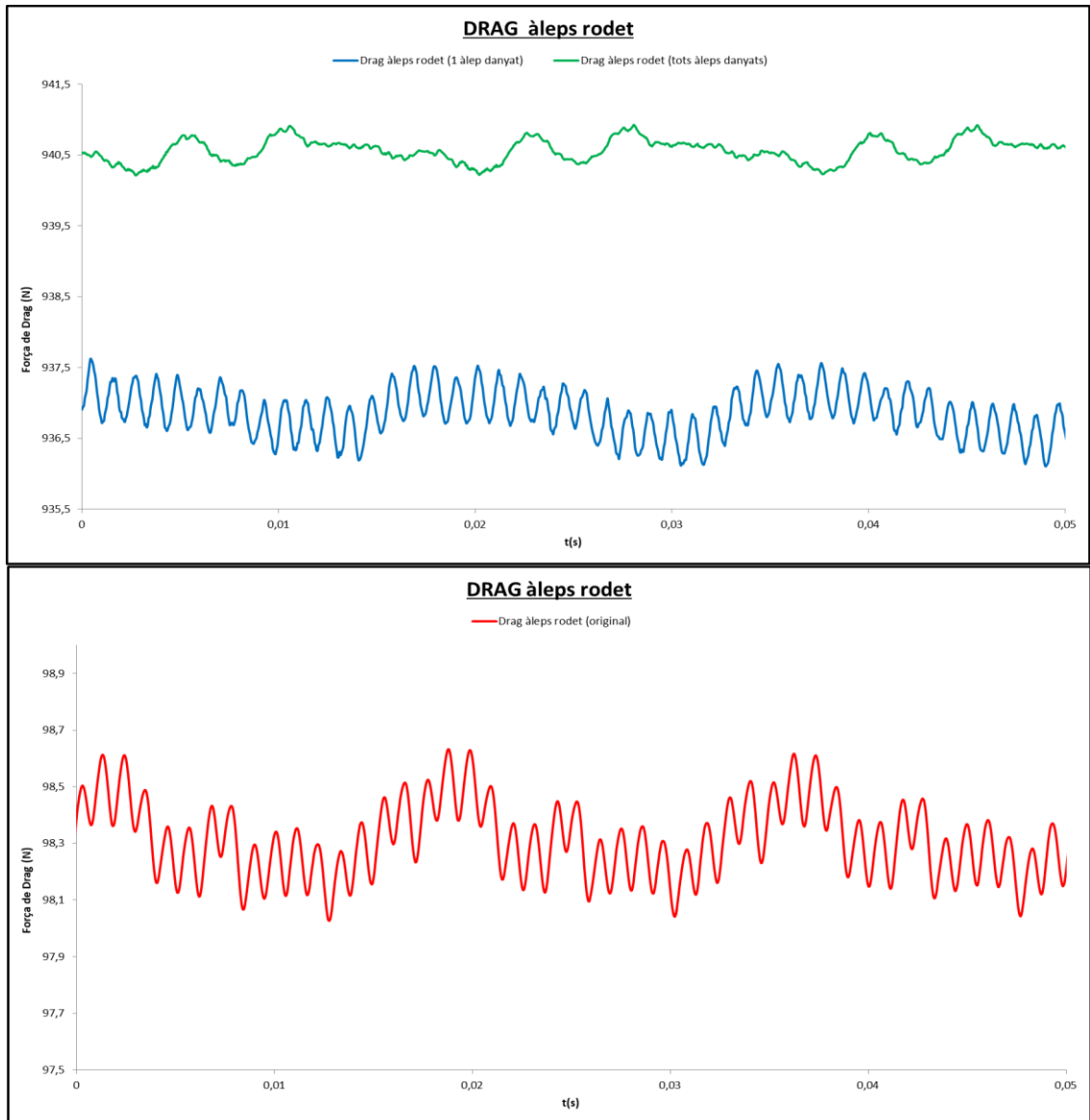


Figura 91. Forces de *drag* als àleps del rotor en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de forces de <i>drag</i> als àleps del rodet (N)
Geometria original	98,313
Geometria d'un àlep danyat	936,866
Geometria de tots els àleps danyats	940,561

Taula 10. Valors mitjans de forces de *drag* als àleps del rotor. -Font: Elaboració pròpia.

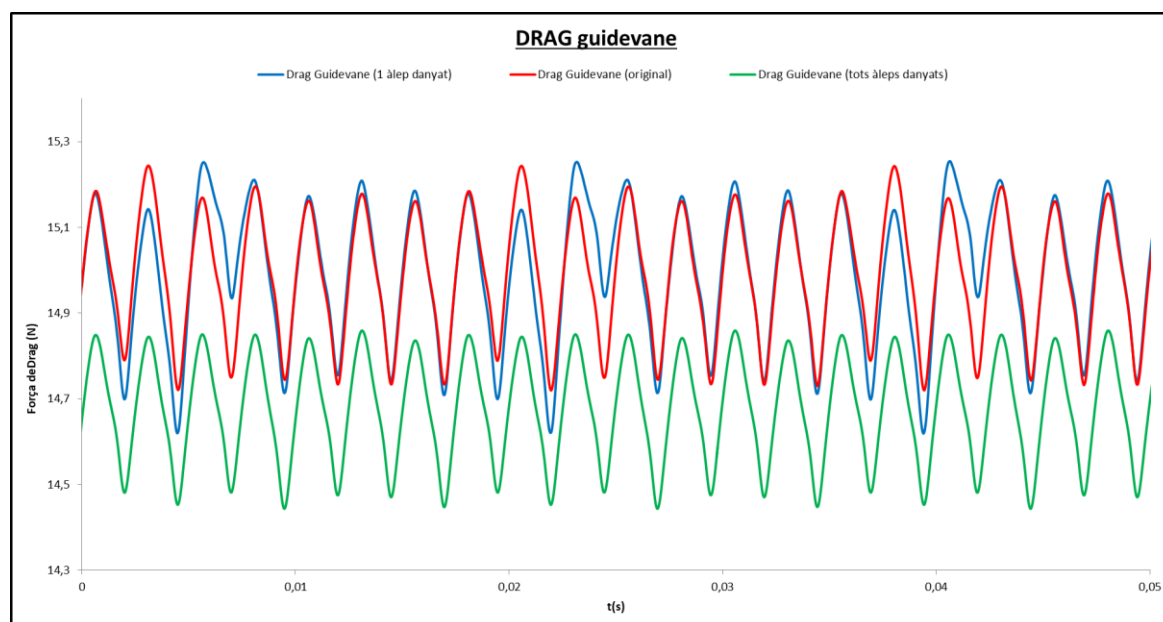


Figura 92. Forces de *drag* als *guidevanes* en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de forces de <i>drag</i> als <i>guidevanes</i> (N)
Geometria original	14,988
Geometria d'un àlep danyat	14,991
Geometria de tots els àleps danyats	14,675

Taula 11. Valors mitjans de forces de *drag* als *guidevanes*. -Font: Elaboració pròpia.

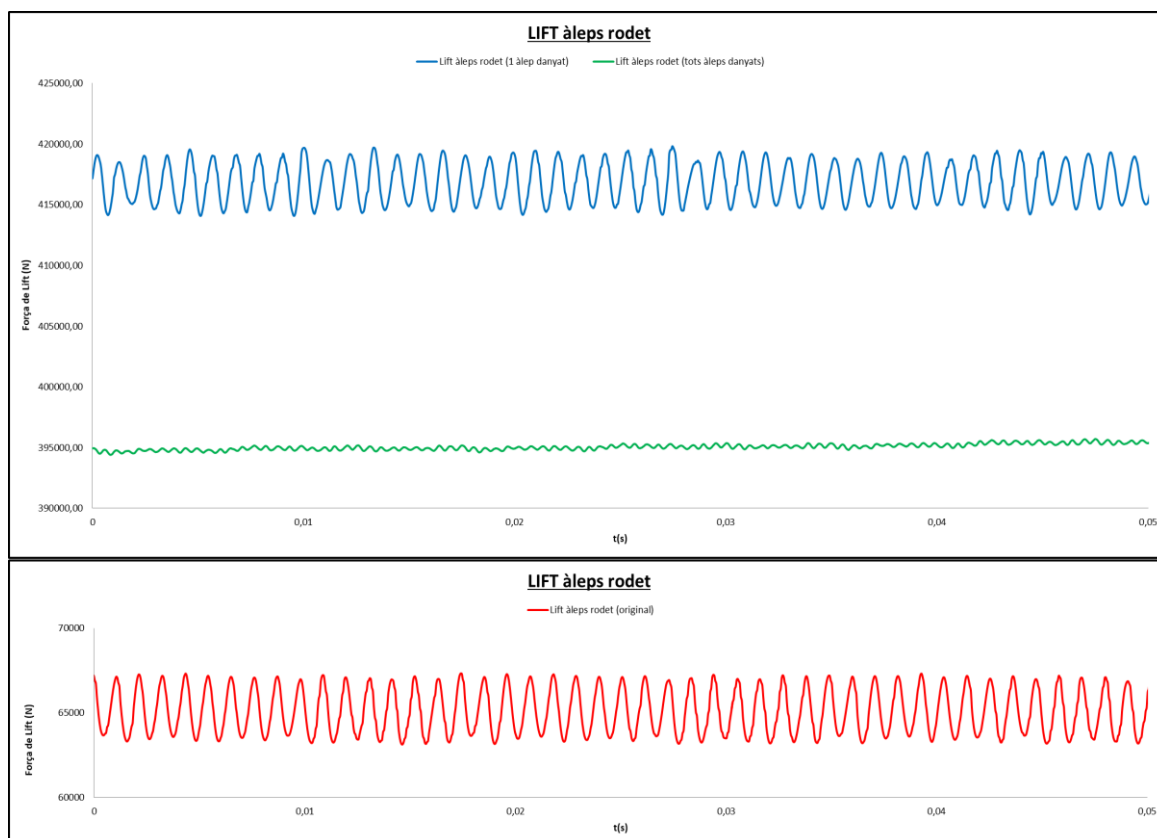


Figura 93. Forces de *lift* als àleps del rotor en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de forces de <i>lift</i> als àleps del rodet (N)
Geometria original	65.118,294
Geometria d'un àlep danyat	416.863,543
Geometria de tots els àleps danyats	395.207,037

Taula 12. Valors mitjans de forces de *lift* als àleps del rotor. -Font: Elaboració pròpia.

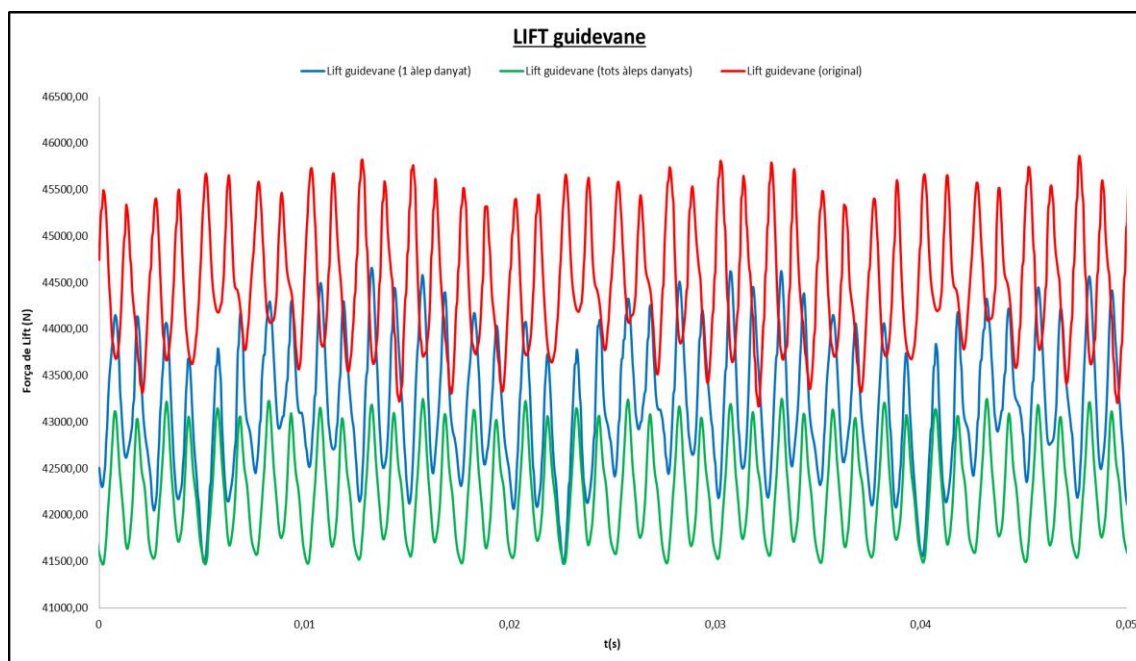


Figura 94. Forces de *lift* als *guidevanes* en els tres casos. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de forces de <i>lift</i> als <i>guidevanes</i> (N)
Geometria original	44.491,641
Geometria d'un àlep danyat	43.162,621
Geometria de tots els àleps danyats	42.269,259

Taula 13. Valors mitjans de forces de *lift* als *guidevanes*. -Font: Elaboració pròpia.

Pel que fa als resultats obtinguts a les forces de *drag* i *lift*, es pot observar que, quan estan referides als *guidevanes*, les forces no varien gaire en els tres casos. Però, si s'observen el gràfics de les forces de *lift* i *drag* localitzades als àleps del rodet, es fa patent que hi ha una diferencia considerable entre la geometria original respecte les que estan malmeses. Aquesta diferencia ve donada pels efectes que provoquen la variació de la geometria dels àleps en els fluxos i per tant, sobre les forces sobre el àleps. És a dir, el fet que hi hagin forats als àleps fa que augmentin les forces als àleps del rodet.

4.2.1.1. Freqüències dels monitors de drag i lift

	Freqüències de <i>drag</i> als àleps del rodet (Hz)						
Original	916,6	57,3	114,6	229,2	458,3	171,9	343,7
1 àlep danyat	916,0	57,3	114,5	229,0	171,8	400,8	28,6
Tots àleps danyats	57,3	171,9	229,2	114,6	401,0	1833,3	802,1

Taula 14. Freqüències de *drag* al àleps del rotor. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències de <i>drag</i> als guidevanes (Hz)						
Original	401,0	802,1	171,9	1203,1	57,3	114,6	229,2
1 àlep danyat	400,8	171,8	114,5	57,3	229,0	801,5	286,3
Tots àleps danyats	401,0	802,1	1203,1	171,9	114,6	229,2	1604,1

Taula 15. Freqüències de *drag* als guidevanes. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències de <i>lift</i> als àleps del rodet (Hz)						
Original	916,6	1833,3	57,3	1260,4	229,2	1489,5	458,3
1 àlep danyat	916,0	930,3	1832,0	973,3	1488,5	944,6	1202,3
Tots àleps danyats	14,3	28,6	57,3	1833,3	43,0	71,6	85,9

Taula 16. Freqüències de *lift* al àleps del rotor. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències de <i>lift</i> als <i>guidevanes</i> (Hz)						
Original	802,1	401,0	1203,1	859,4	57,3	2005,2	1604,1
1 àlep danyat	801,5	57,3	400,8	114,5	1202,3	916,0	171,8
Tots àleps danyats	802,1	401,0	1203,1	2005,2	1604,1	2807,2	171,9

Taula 17. Freqüències de *lift* als *guidevanes*. -Font: Elaboració pròpia.

En referència a les freqüències obtingudes, es pot treure informació referida a la identificació del RSI. Pel que fa a les taules de freqüències associades a les forces de *drag* i *lift* als àleps del rodet, es pot observar com les primeres freqüències que apareixen coincideixen amb les freqüències de pulsació dels àleps de l'estator i, pel que fa a les referides als *guidevanes*, coincideixen en gran mesura a les freqüències de pulsació del rotor.

Si s'observa les freqüències que apareixen als àleps del rodet associades a les forces de *drag* i *lift* (Taula 14 i Taula 16), es fa patent que les primeres freqüències coincideixen amb les que haurien de sortir si es pretén identificar la interacció rotor-estator. Cal mencionar que a la geometria de tots els àleps malmesos, les primeres freqüències que apareixen no coincideixen amb les de la interacció rotor-estator. Es pot identificar una associada al RSI (1833,3 Hz) en les últimes posicions, això pot voler dir que és possible que hi hagi altres fenòmens afectant al sistema que són més notables que el RSI. Aquesta disparitat de freqüències pot ésser ocasionada, en gran mesura, pel fet que hi hagi tots els àleps danyats.

Les freqüències referides als les forces de *drag* i *lift* als *guidevanes*, es pot veure com en els tres casos la freqüència principal coincideix amb la freqüència de pulsació del rodet, com s'ha esmentat anteriorment. Per tant, es pot concloure que a les freqüències associades a les forces de *drag* i *lift* s'observa l'aparició de la interacció rotor-estator com a fenomen principal. Els gràfics de les freqüències obtingudes als monitors de les forces de *drag* i *lift* es troben al Annex2.

4.2.2. Monitors al rotor

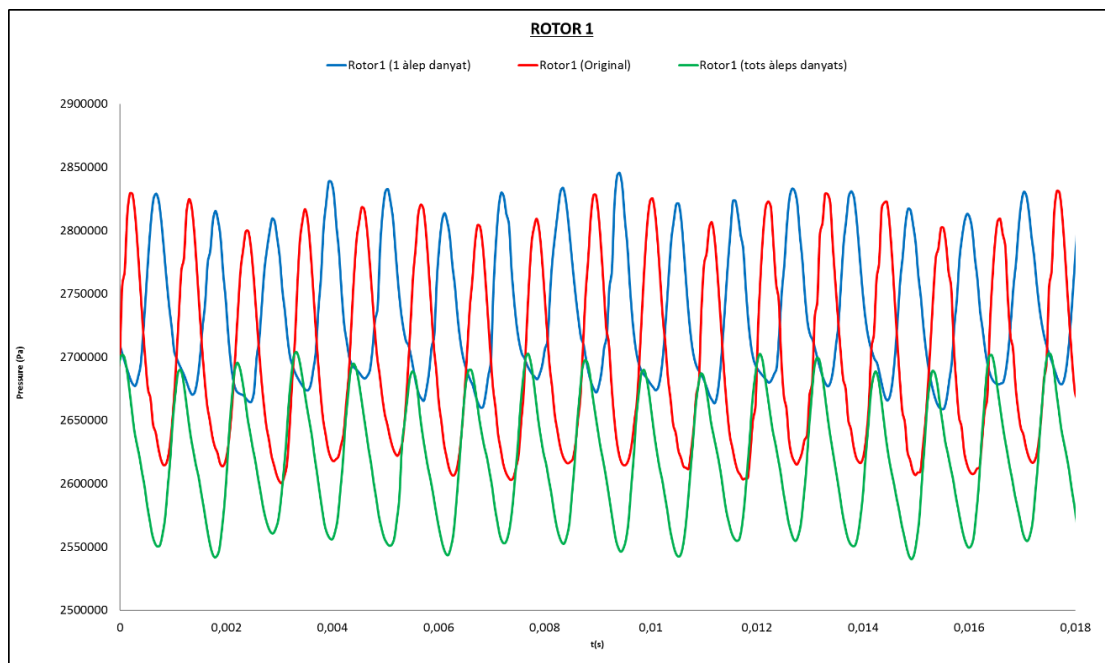


Figura 95. Valors de pressió dels tres casos al Rotor1. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Rotor1 (Pa)
Geometria original	2.697.652,665
Geometria d'un àlep danyat	2.634.211,094
Geometria de tots els àleps danyats	2.517.631,398

Taula 18. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor1. -Font: Elaboració pròpia.

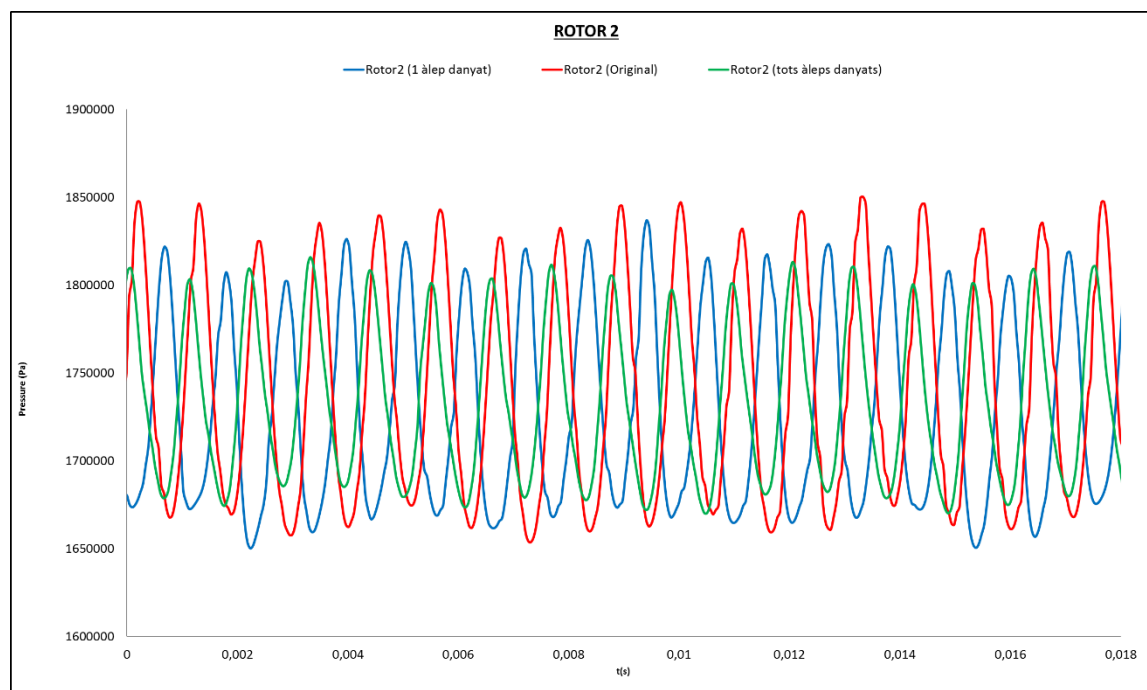


Figura 96. Valors de pressió dels tres casos al Rotor2. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Rotor2 (Pa)
Geometria original	1.740.125,828
Geometria d'un àlep danyat	1.628.840,784
Geometria de tots els àleps danyats	1.634.523,350

Taula 19. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor2. -Font: Elaboració pròpia.

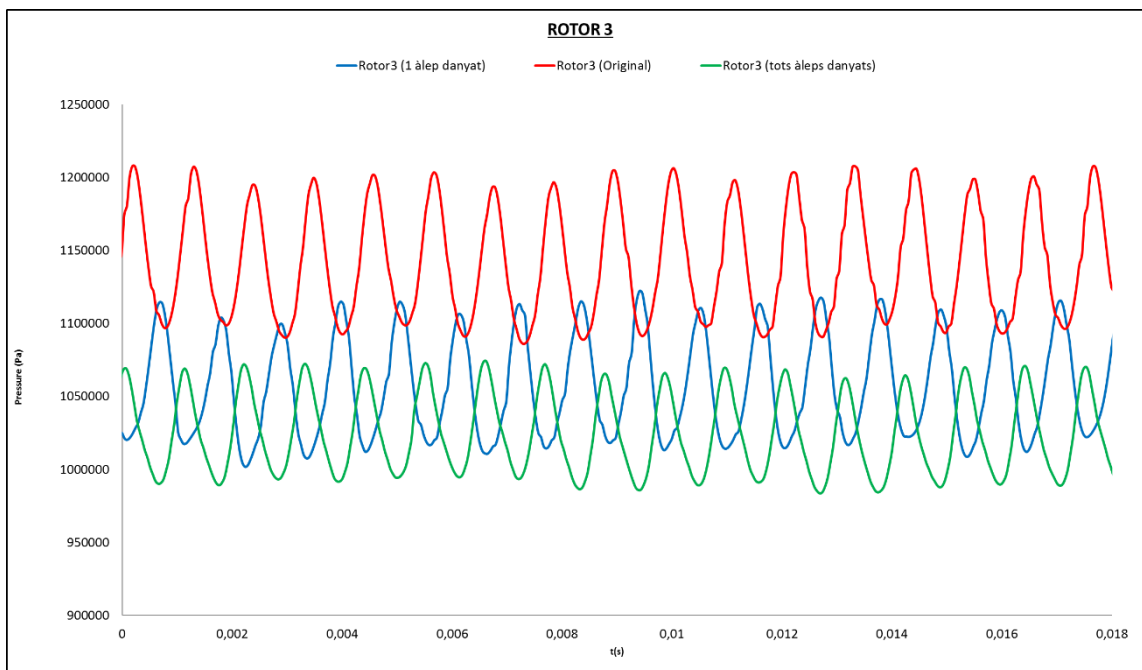


Figura 97. Valors de pressió dels tres casos al Rotor3. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Rotor3 (Pa)
Geometria original	1.140.736,079
Geometria d'un àlep danyat	956.841,954
Geometria de tots els àleps danyats	925.321,947

Taula 20. Valors mitjans de pressions al monitor Rotor3. -Font: Elaboració pròpia.

Els valors de pressions als monitors localitzats al rodet, no presenten gaire variació en els resultats dels tres casos. Tant en el monitor R1 com R2, els valors de pressions que s'obtenen són de magnituds molt similars entre les tres simulacions. El que sí que es pot observar amb claredat és que en els tres monitors localitzats al rotor (R1, R2, R3), les funcions es troben desfasades les unes amb les altres. Aquest desfasament és deu als danys que presenta el rotor a la sortida dels àleps. Pel que fa als resultats obtinguts al monitor R3, els resultats de l'original respecte les geometries danyades presenten una petita variació degut a que el monitor R3 és el més pròxim als forats i, per tant, a les geometries malmeses els valors de pressió són menors als de la geometria original.

4.2.2.1. Freqüències dels monitors al rotor

	Freqüències al monitor Rotor1 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	1260,4	1375,0	859,4	687,5
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	930,3	1545,8	944,6	973,3
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	114,6	1947,9	343,7

Taula 21. Freqüències al Rotor1. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor Rotor2 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	57,3	687,5	1260,4	1375,0
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	930,3	57,3	944,6	973,3
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	114,6	57,3	2749,9	171,9

Taula 22. Freqüències al Rotor2. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor Rotor3 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	57,3	687,5	1260,4	1375,0
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	57,3	930,3	944,6	973,3
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	57,3	229,2	171,9	2749,9	14,3

Taula 23. Freqüències al Rotor3. -Font: Elaboració pròpia.

Al observar les freqüències que surten com a resultat als monitors al rotor, es fa patent que com a fenomen principal s'origina la interacció rotor-estator.

Es veu clarament com les primeres freqüències que s'obtenen són les principals freqüències de pulsació de l'estator i, ja que estem en els monitors localitzats al rotor, es torna a comprovar que, per a les tres geometries, apareix el RSI entre els àleps del rodet i els àleps de l'estator. Els gràfics de les freqüències obtingudes als monitors del rodet es troben al Annex2.

4.2.3. Monitors a l'estator

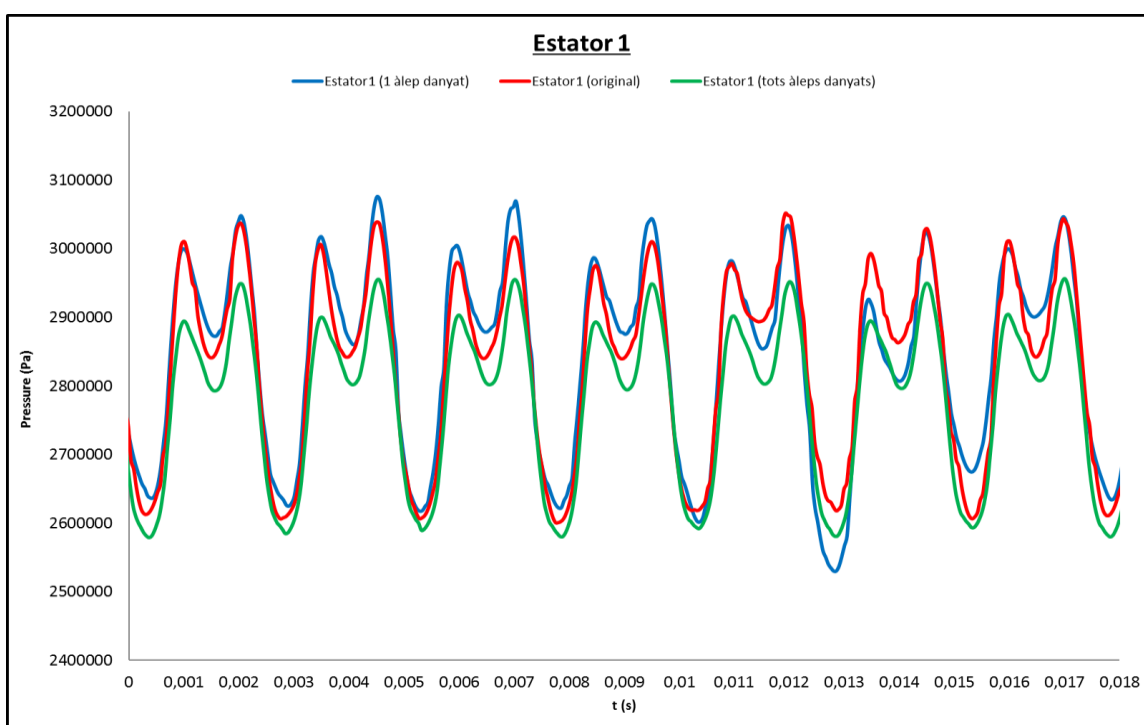


Figura 98. Valors de pressió dels tres casos a l'Estator1. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions a l'Estator1 (Pa)
Geometria original	2.835.033,407
Geometria d'un àlep danyat	2.745.214,352
Geometria de tots els àleps danyats	2.684.784,944

Taula 24. Valors mitjans de pressions al monitor Estator1. -Font: Elaboració pròpia.

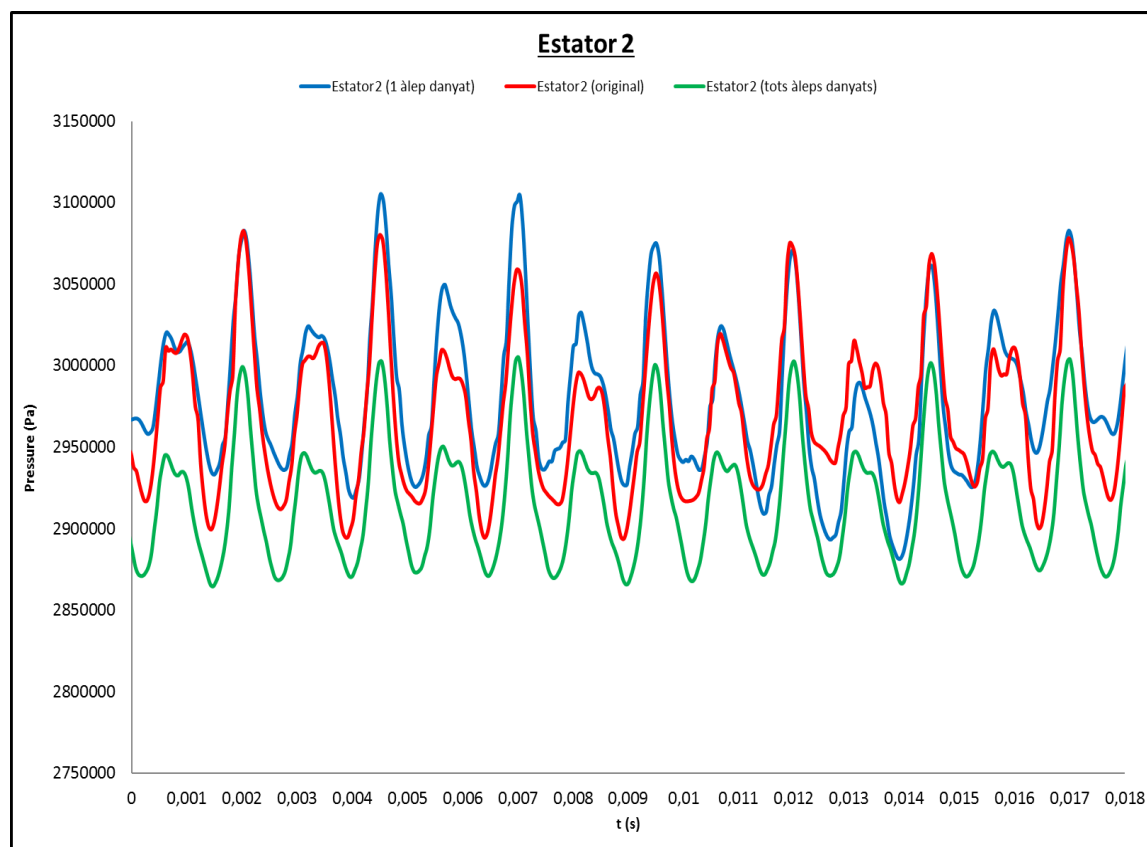


Figura 99. Valors de pressió dels tres casos a l'Estator2. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions a l'Estator2 (Pa)
Geometria original	2.970.582,617
Geometria d'un àlep danyat	2.880.359,444
Geometria de tots els àleps danyats	2.817.044,680

Taula 25. Valors mitjans de pressions al monitor Estator2. -Font: Elaboració pròpia.

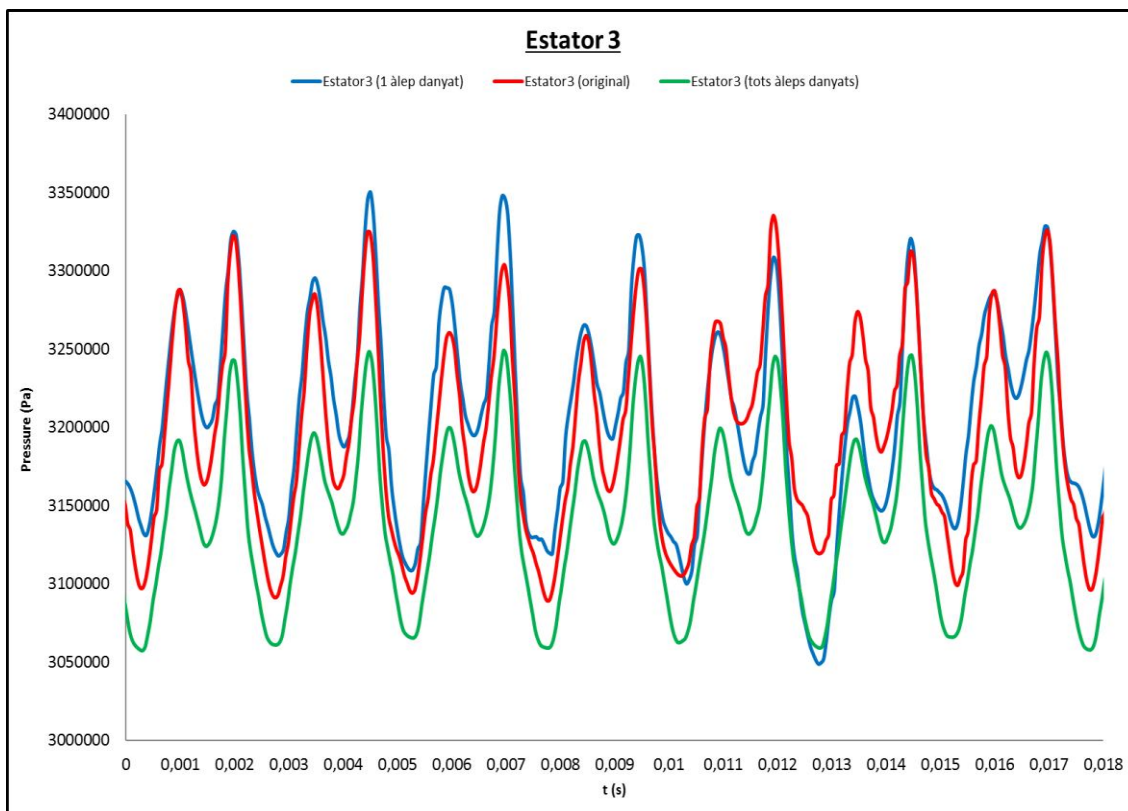


Figura 100. Valors de pressió dels tres casos a l'Estator3. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions a l'Estator3 (Pa)
Geometria original	3.196.579,147
Geometria d'un àlep danyat	3.106.438,821
Geometria de tots els àleps danyats	3.043.005,257

Taula 26. Valors mitjans de pressions al monitor Estator3. -Font: Elaboració pròpia.

Els resultats obtinguts de pressions als monitors de l'estator no presenten gaire variacions entre les diferents geometries. Les variacions als monitors entre geometries són insignificants com per tenir que aprofundir en elles, ja que aquestes mínimes variacions poden ser ocasionades per la qualitat de la malla en aquelles zones. S'observa com totes les senyals es troben en fase ja que a l'estator no es produeix cap fenomen que pugui ocasionar interferències o desplaçaments de les funcions associades als valors de pressió.

4.2.3.1. Freqüències dels monitors de l'estator

	Freqüències al monitor Estator1 (Hz)						
Original	401,0	802,1	1203,1	1604,1	57,3	859,4	2005,2
1 àlep danyat	400,8	801,5	1202,3	57,3	1603,0	114,5	171,8
Tots àleps danyats	401,0	802,1	1203,1	1604,1	2005,2	171,9	2807,2

Taula 27. Freqüències a l'Estator1. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor Estator2 (Hz)						
Original	802,1	1203,1	401,0	2005,2	859,4	57,3	1604,1
1 àlep danyat	801,5	57,3	1202,3	114,5	1603,0	400,8	916,0
Tots àleps danyats	802,1	1203,1	401,0	1604,1	2005,2	2807,2	171,9

Taula 28. Freqüències a l'Estator2. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor Estator3 (Hz)						
Original	802,1	401,0	1203,1	2005,2	859,4	57,3	1604,1
1 àlep danyat	801,5	400,8	1202,3	57,3	114,5	171,8	1603,0
Tots àleps danyats	802,1	401,0	1203,1	1604,1	2005,2	2807,2	171,9

Taula 29. Freqüències a l'Estator3. -Font: Elaboració pròpia.

En referència a les freqüències obtingudes als monitors de l'estator es pot observar com apareixen, en les primeres posicions, les freqüències de pulsació del rodet. Això denota com, de nou, es torna a identificar amb claredat la interacció rotor-estator. Els gràfics de les freqüències obtingudes als monitors de l'estator es troben al Annex2.

4.2.4. Monitors a les *interfaces* (IF)

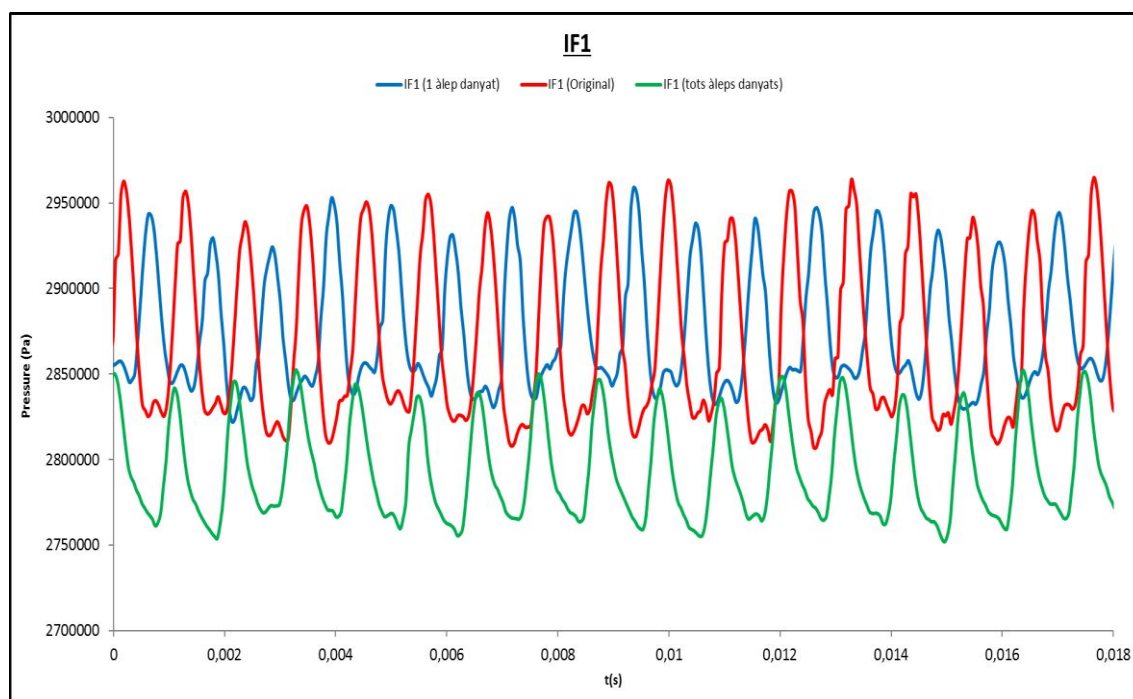


Figura 101. Valors de pressió dels tres casos al IF1. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al IF1 (Pa)
Geometria original	2.867.538,127
Geometria d'un àlep danyat	2.775.280,822
Geometria de tots els àleps danyats	2.693.532,301

Taula 30. Valors mitjans de pressions al monitor IF1. -Font: Elaboració pròpia.

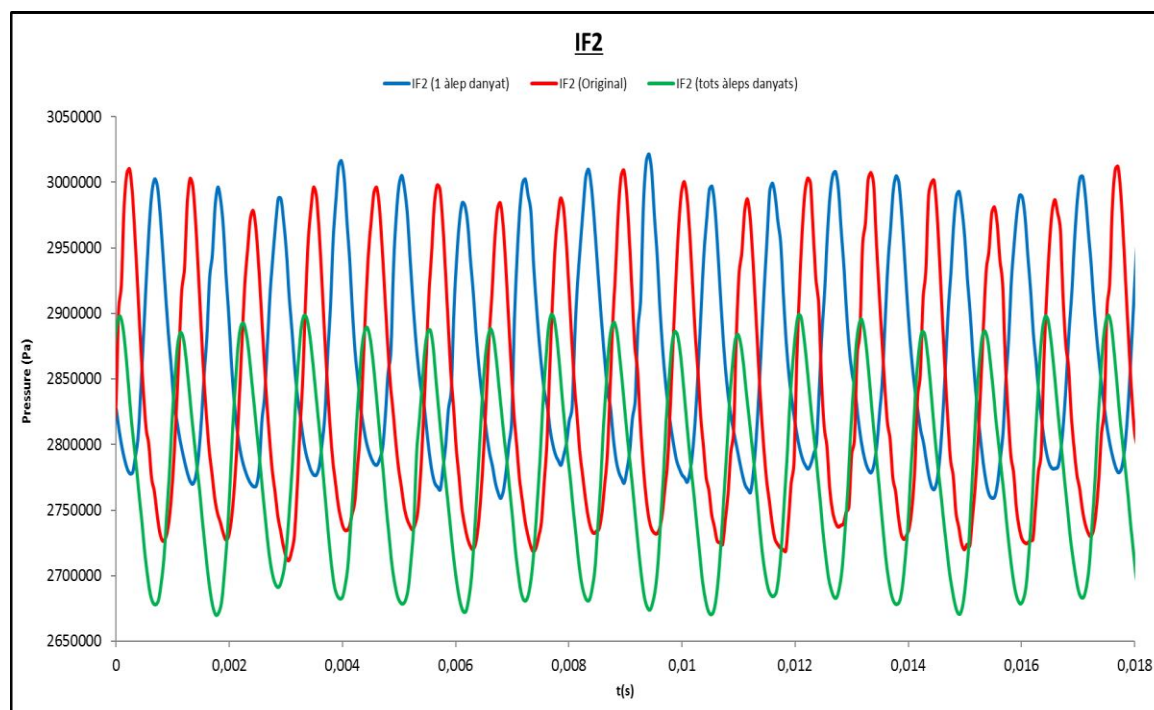


Figura 102. Valors de pressió dels tres casos al IF2. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al IF2 (Pa)
Geometria original	2.838.010,589
Geometria d'un àlep danyat	2.768.536,763
Geometria de tots els àleps danyats	2.678.138,147

Taula 31. Valors mitjans de pressions al monitor IF2. -Font: Elaboració pròpia.

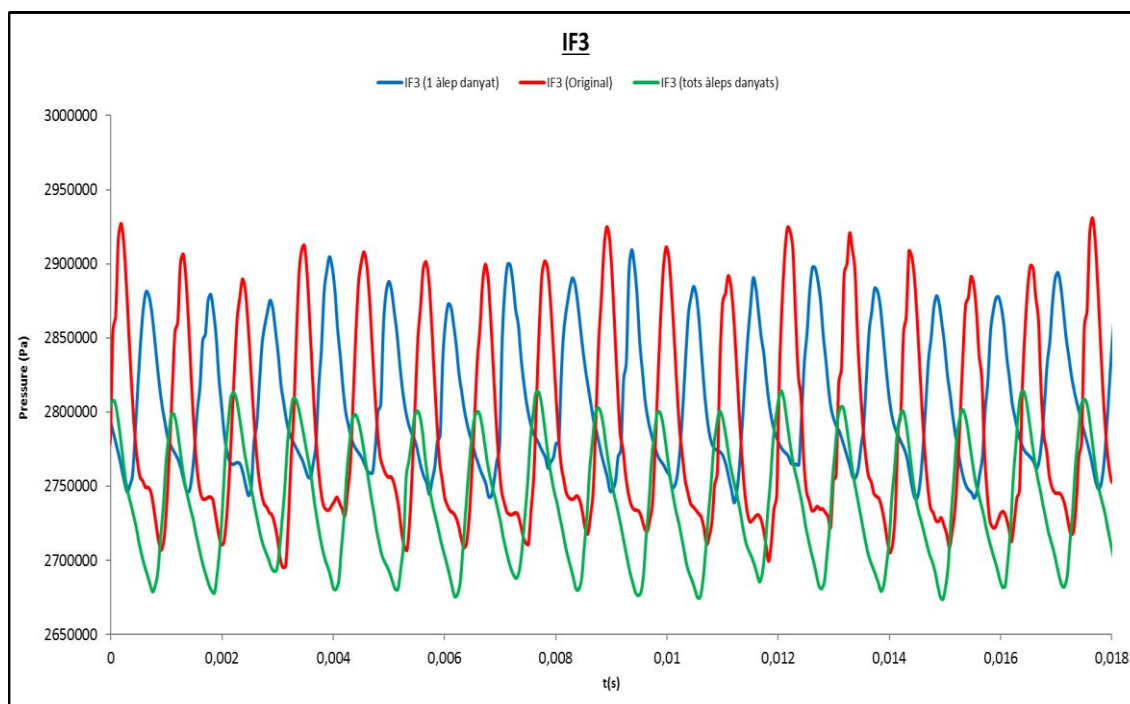


Figura 103. Valors de pressió dels tres casos al IF3. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al IF3 (Pa)
Geometria original	2.786.598,624
Geometria d'un àlep danyat	2.706.827,234
Geometria de tots els àleps danyats	2.639.582,902

Taula 32. Valors mitjans de pressions al monitor IF3. -Font: Elaboració pròpia.

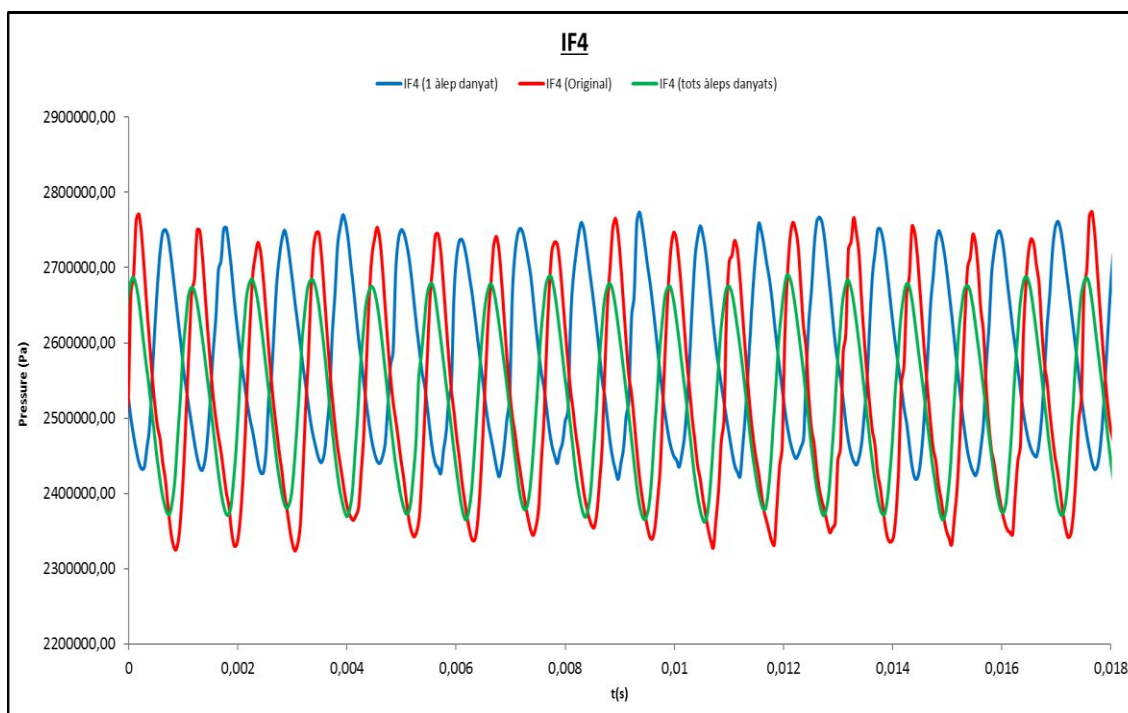


Figura 104. Valors de pressió dels tres casos al IF4. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al IF4 (Pa)
Geometria original	2.521.770,473
Geometria d'un àlep danyat	2.484.924,358
Geometria de tots els àleps danyats	2.428.221,493

Taula 33. Valors mitjans de pressions al monitor IF4. -Font: Elaboració pròpia.

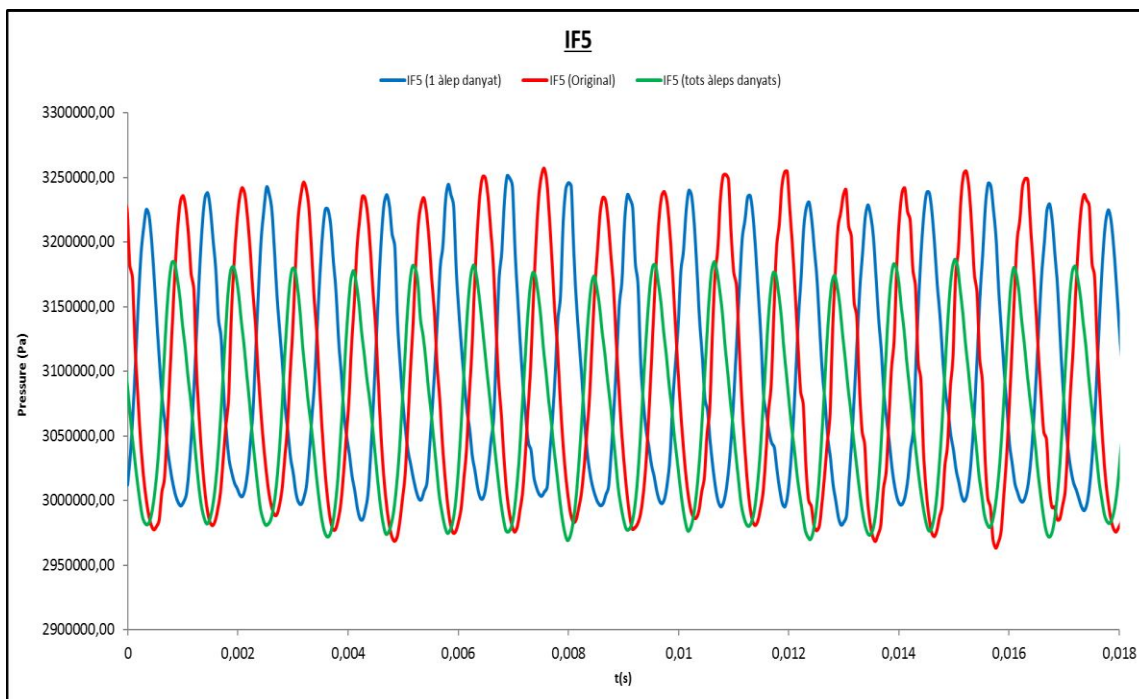


Figura 105. Valors de pressió dels tres casos al IF5. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al IF5 (Pa)
Geometria original	3.098.214,447
Geometria d'un àlep danyat	2.999.255,894
Geometria de tots els àleps danyats	2.970.264,744

Taula 34. Valors mitjans de pressions al monitor IF5. -Font: Elaboració pròpia.

Pel que fa als resultats dels monitors que es localitzen a la *interface* entre l'estator i rotor, es pot apreciar que els valors, entre les tres simulacions, no oscil·len gaire sinó prenen valors similars en cada monitor. El que es pot veure als monitors IF1, IF2 i IF3 (Figura 101, Figura 102, Figura 103), els valors de la geometria que té tots els àleps danyats, queden per sota de les altres dos senyals. De fet, es pot apreciar a les taules de valors mitjans que la geometria més malmesa és la que pren valors menors. Cal mencionar que al observar les gràfiques s'aprecia que les funcions de les tres simulacions estan desfasades entre elles. Aquest desfasament és conseqüència directa de la interacció rotor-estator, cosa que té sentit ja que els monitors es troben on es produeix aquest fenomen.

Cal comprovar les freqüències obtingues per acabar d'assegurar si realment es produeix aquest fenomen. A continuació es procedeix a realitzar la comprovació amb les freqüències.

4.2.4.1. Freqüències dels monitors IF

	Freqüències al monitor IF1 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	1260,4	687,5	2749,9	1375,0
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	1545,8	687,0	1846,3	1860,6
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	114,6	1947,9	458,3

Taula 35. Freqüències a la *interface IF1*. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor IF2 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	1260,4	1375,0	2749,9	859,4
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	930,3	944,6	901,7	973,3
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	343,7	1947,9	458,3

Taula 36. Freqüències a la *interface IF2*. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor IF3(Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	1260,4	2749,9	1375,0	859,4
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	2748,0	930,3	1259,5	1545,8
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	458,3	171,9	343,7

Taula 37. Freqüències a la *interface IF3*. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor IF4 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	1260,4	2749,9	458,3	859,4
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	930,3	2748,0	944,6	901,7
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	458,3	687,5	171,9

Taula 38. Freqüències a la *interface* IF4. -Font: Elaboració pròpia.

	Freqüències al monitor IF5 (Hz)						
Original	916,6	1833,3	229,2	687,5	1260,4	1489,5	1088,5
1 àlep danyat	916,0	1832,0	229,0	930,3	944,6	901,7	887,4
Tots àleps danyats	916,6	1833,3	229,2	2749,9	114,6	57,3	1947,9

Taula 39. Freqüències a la *interface* IF5. -Font: Elaboració pròpia.

En observar els resultat de les freqüències obtingudes als monitors a la *interface* estator-rotor, es veuen certs valors que es repeteixen. Si s'observen les primeres freqüències que apareixen a totes les taules de freqüències dels monitors, totes coincideixen amb les freqüències de pulsació de l'estator. Tenint en compte que els monitors estan més pròxims als rodet que a l'estator (veure Figura 69) i les freqüències que surten són les associades a $F_{p,estator}$ es pot afirmar amb seguretat que el fenomen que apareix de manera més notòria és el RSI. En relació a les altres freqüències que apareixen, algunes són derivades de les freqüències de pulsació però no coincideix del tot el valor ja que estan solapades amb altres fenòmens com els vòrtex, entre d'altres. Les que no són derivades de les freqüències de pulsació poden estar informant d'altres fenòmens que succeeixen l'interior de la turbina però, en qualsevol cas, són de menor rellevància que l'RSI. Els gràfics de les freqüències obtingudes als monitors de les *interfaces* es troben al Annex2.

Per concloure la identificació de la interacció estator-rotor amb l'ajuda de les freqüències, es pot assegurar robustament que entre els àleps de l'estator i els àleps del rodet es produeix RSI.

4.2.5. Monitors al tub d'aspiració

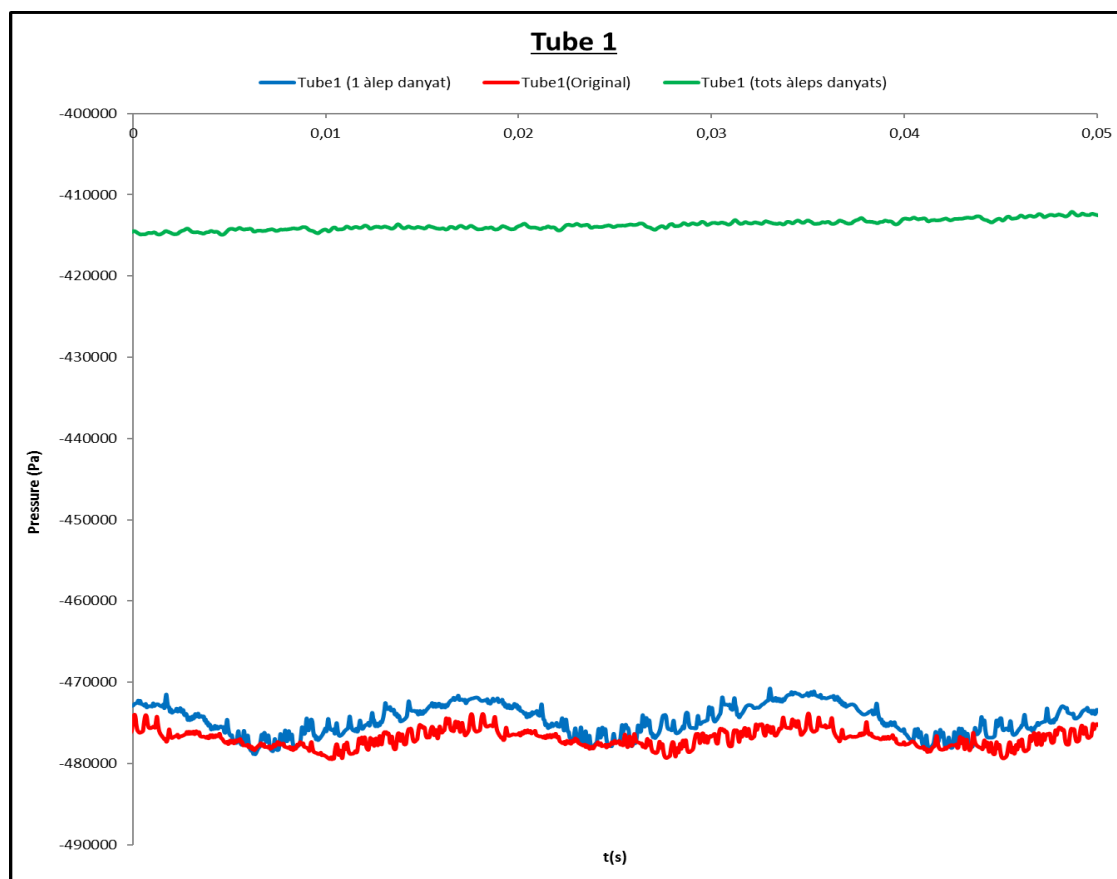


Figura 106. Valors de pressió dels tres casos al Tube1. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Tube1 (Pa)
Geometria original	-476.987,749
Geometria d'un àlep danyat	-474.543,096
Geometria de tots els àleps danyats	-412.695,387

Taula 40. Valors mitjans de pressions al monitor Tube1. -Font: Elaboració pròpia.

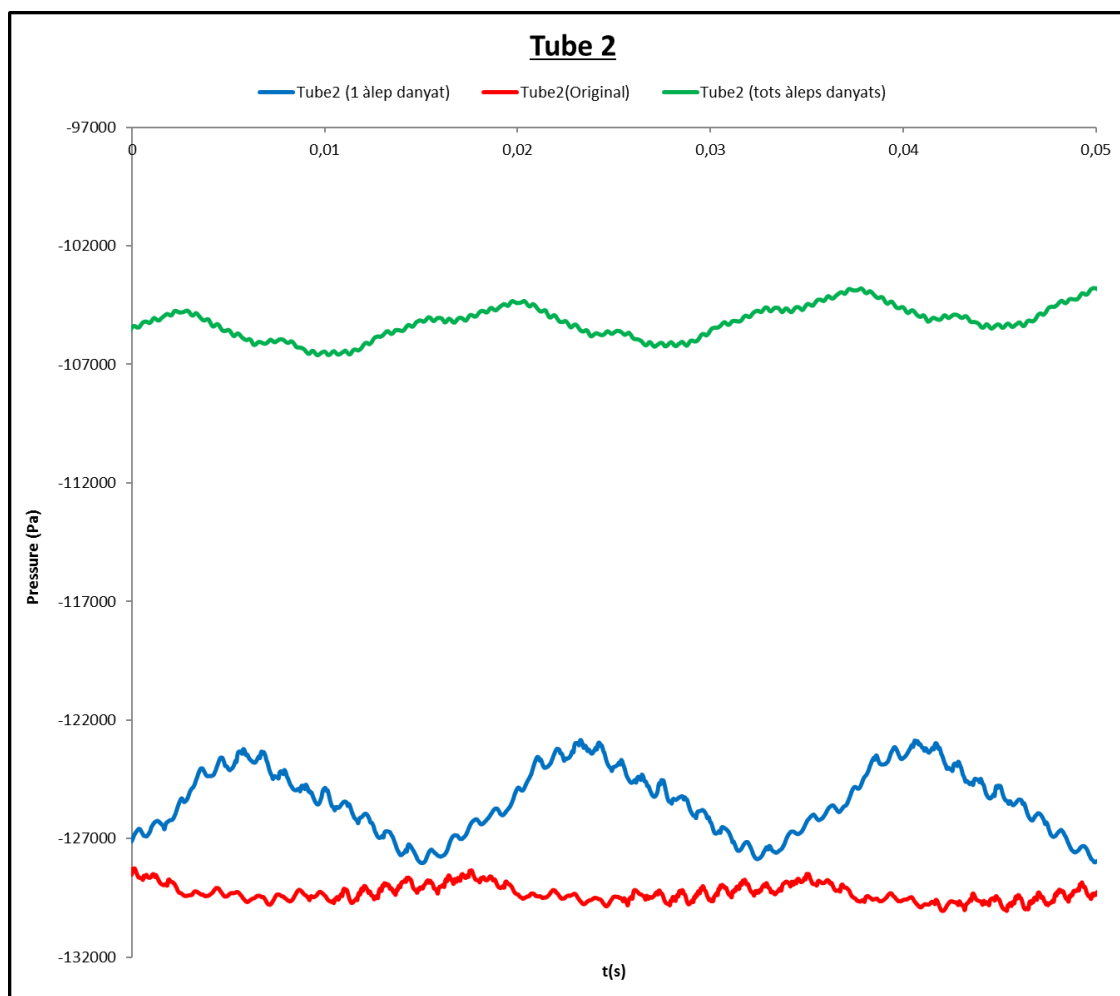


Figura 107. Valors de pressió dels tres casos al Tube2. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Tube2 (Pa)
Geometria original	-129.349,518
Geometria d'un àlep danyat	-125.498,196
Geometria de tots els àleps danyats	-104.626,945

Taula 41. Valors mitjans de pressions al monitor Tube2. -Font: Elaboració pròpia.

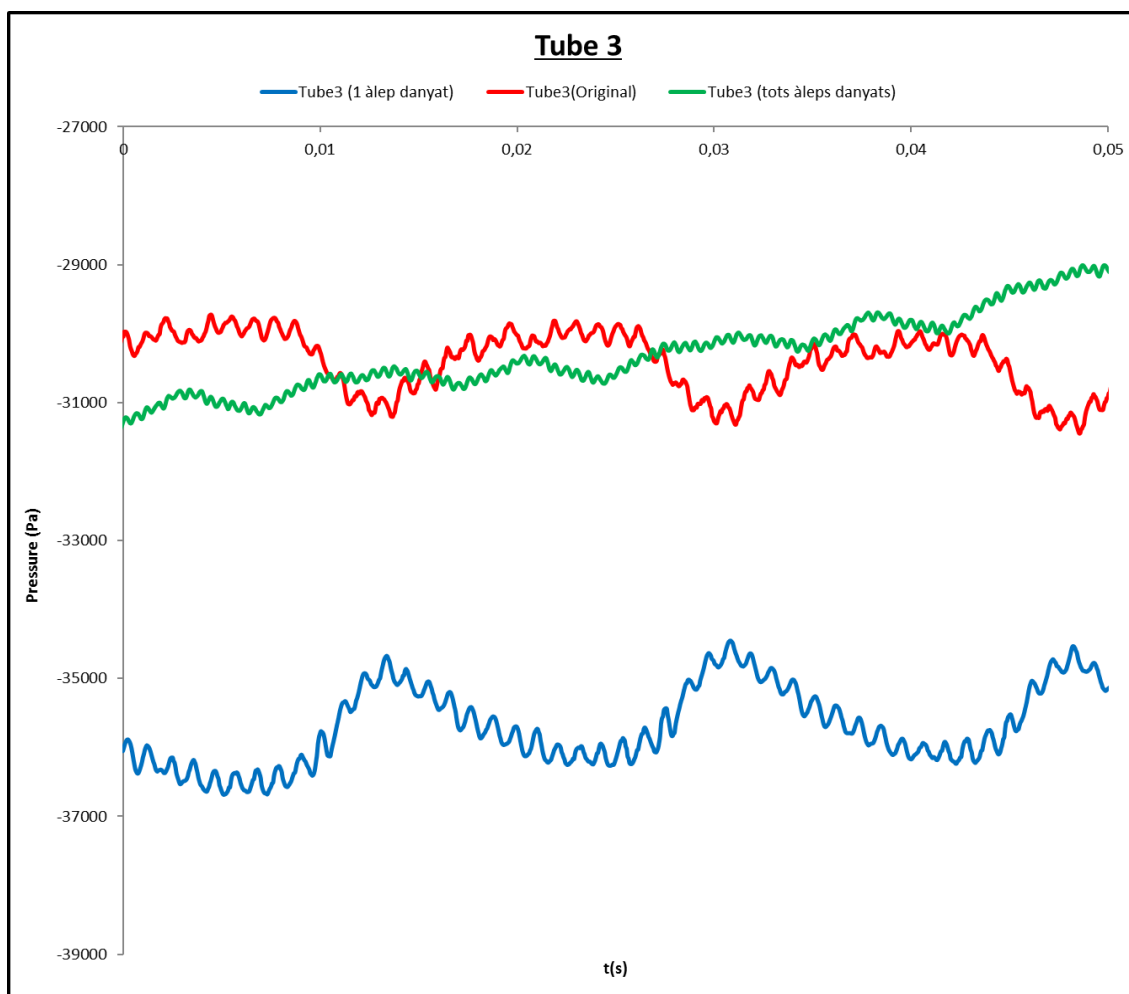


Figura 108. Valors de pressió dels tres casos al Tube3. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Tube3 (Pa)
Geometria original	-30.447,626
Geometria d'un àlep danyat	-35.685,268
Geometria de tots els àleps danyats	-29.813,549

Taula 42. Valors mitjans de pressions al monitor Tube3. -Font: Elaboració pròpia.

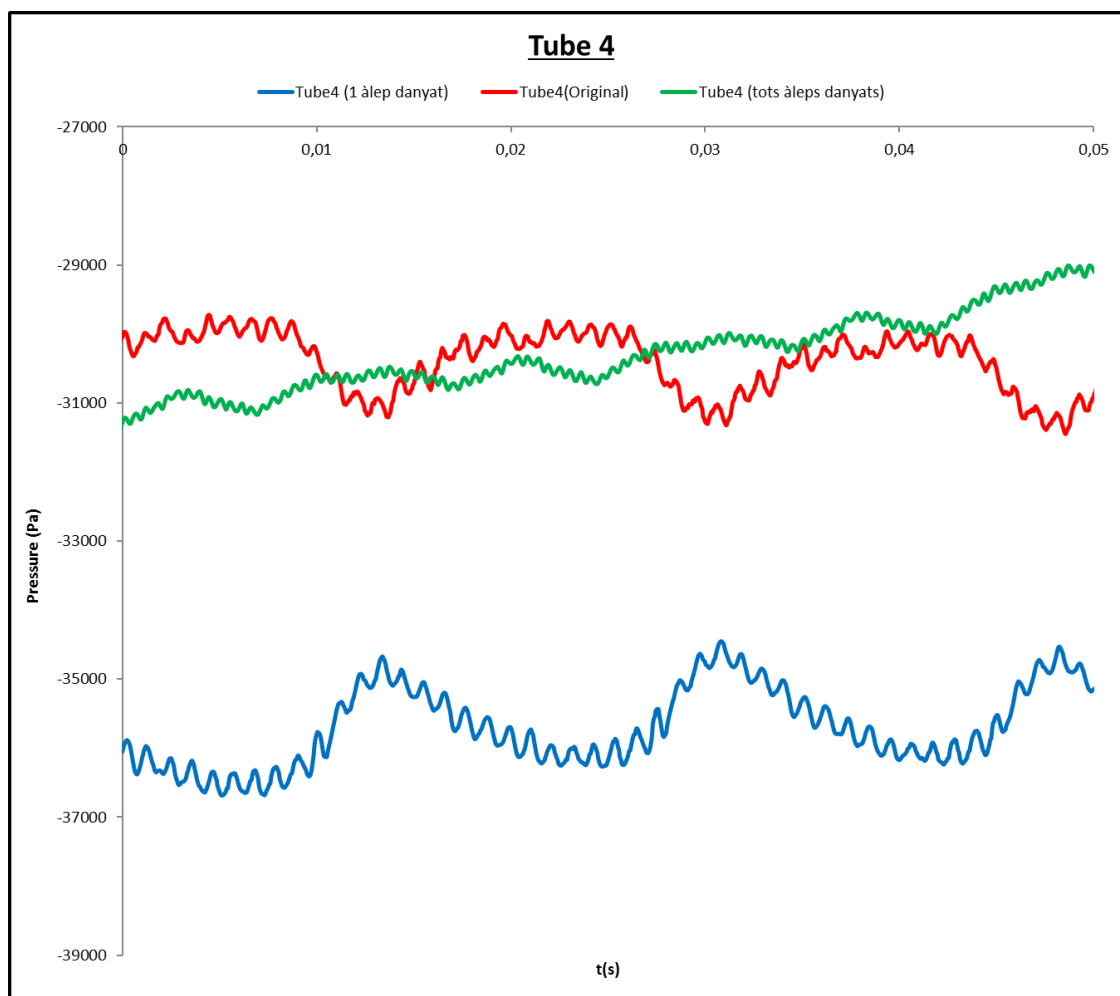


Figura 109. Valors de pressió dels tres casos al Tube4. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Tube4 (Pa)
Geometria original	-30.447,626
Geometria d'un àlep danyat	-35.685,268
Geometria de tots els àleps danyats	-29.813,549

Taula 43. Valors mitjans de pressions al monitor Tube4. -Font: Elaboració pròpia.

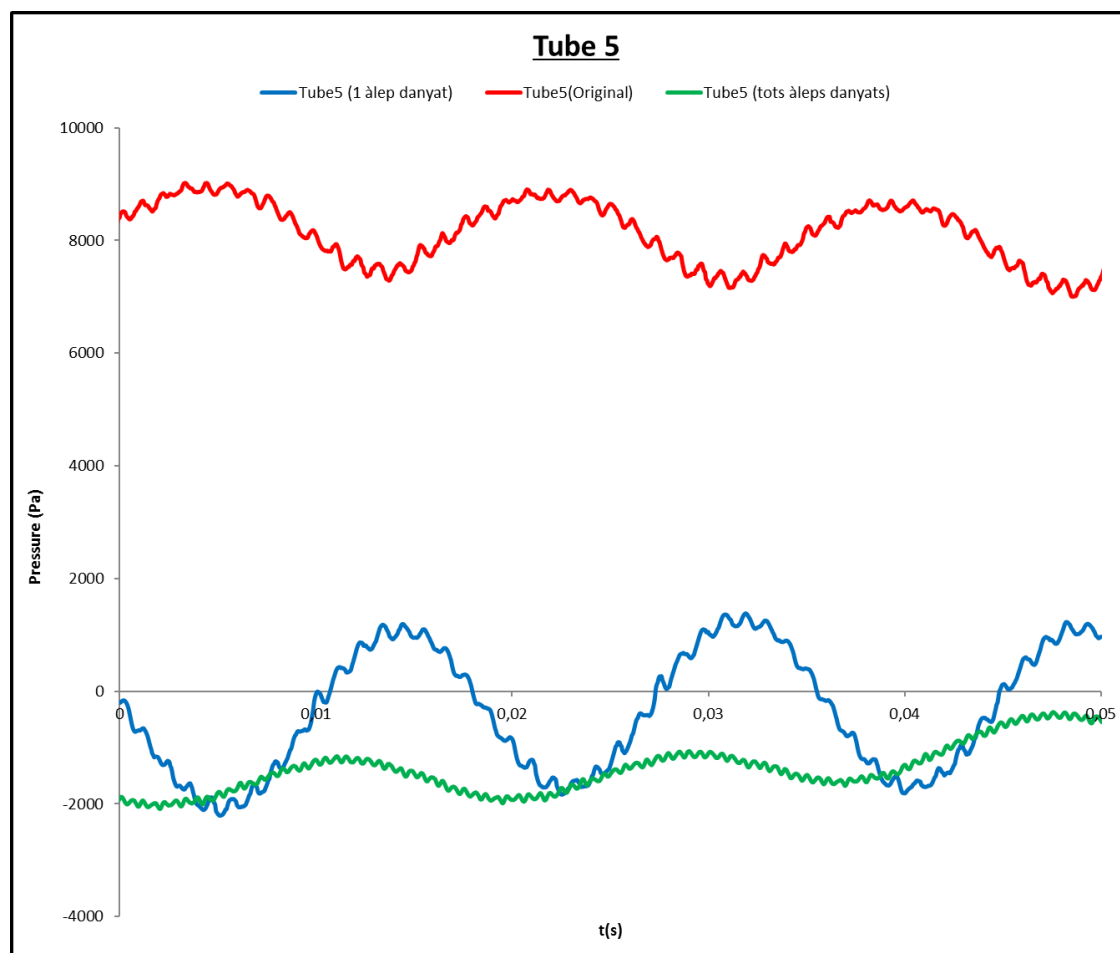


Figura 110. Valors de pressió dels tres casos al Tube5. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions al Tube5 (Pa)
Geometria original	8.062,413
Geometria d'un àlep danyat	-363,500
Geometria de tots els àleps danyats	-1.021,557

Taula 44. Valors mitjans de pressions al monitor Tube5. -Font: Elaboració pròpia.

En relació als resultats obtinguts dels monitors del tub d'aspiració, comentar que no han estat els esperats. Els resultats que s'han obtingut en alguns monitors de les tres simulacions han donat valors que físicament són impossibles ja que, si es treballa amb pressions relatives, el valor mínim admissible és el de $P = -P_{atm}$ (pressió atmosfèrica a la que es troba la central). Els únics monitors que han donat valors físicament acceptables són el Tube3, Tube4 i Tube5. Tot i que físicament són valors que poden ser correctes, es descarten també ja que el resultat dels altres monitors no és admissible.

Aquest problema és degut a un error numèric del CFX al resoldre les equacions, ja que, quan el programa utilitza pressions relatives que corresponen a zones de pressió molt baixes, pot donar valors inferiors al límit. En canvi, si es treballa amb pressions absolutes això no passa, ja que com a mínim donarà valors de $P = 0$ abs. Per tant, a les zones on és possible que es produeixi cavitació és molt millor que el programa guardi les pressions en valor absolut. Aquest error no va ser identificat fins a la última simulació (tots els àleps malmesos) i, per aquesta raó, s'ha optat per afegir dos monitors nous a posicions diferents que s'han configurat per tal que les pressions que recopili el programa siguin en valors absolut. Comentar que no s'han pogut tornar a realitzar les dues simulacions restants (original i un àlep trencat) amb els nous monitors del tub per manca de temps, ja que cada simulació pot trigar a completar-se setmanes o fins i tot mesos.

A continuació, es mostren els resultats obtinguts en els nous monitors afegits a les parets del tub d'aspiració, a la geometria on consten danyats tots els àleps (Figura 70).

4.2.5.1. Nous monitors al tub d'aspiració

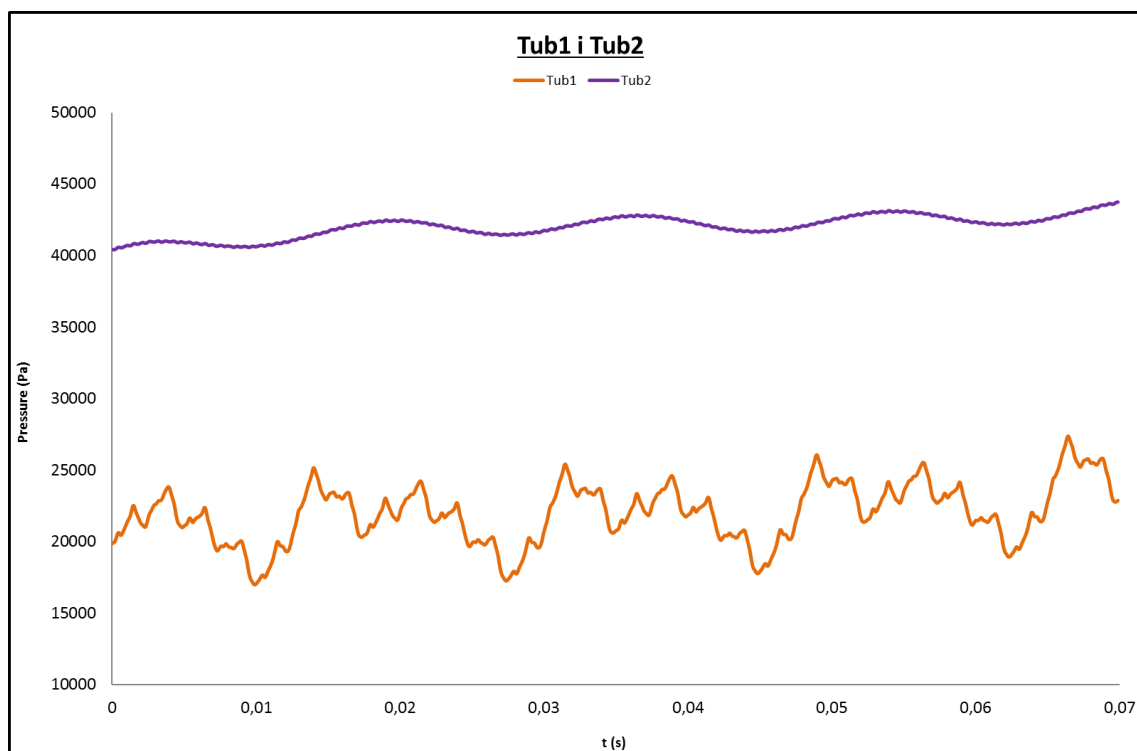


Figura 111. Valors de pressió als nous monitors al tub d'aspiració. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de pressions als nous monitors a la geometria de tots els àleps malmesos (Pa)
Tub1	21.960,218
Tub2	41.950,836

Taula 45. Valors mitjans de pressions als nous monitors (Tub1 i Tub2). -Font: Elaboració pròpia.

Com es pot apreciar a la Figura 111, en utilitzar pressions absolutes surten resultats més raonables que en els monitors anteriors que s'han descartat. Tenint en compte que al final del tub d'aspiració hi ha la P_{atm} , té sentit que el monitor Tub1 tingui una pressió menor que el Tub2, ja que el Tub1 és el més pròxim a la sortida del rodet. A més a més, com ja s'ha comprovat, a la sortida del rotor hi ha cavitació i, per tant, coincideix amb el fet que el Tub1 tingui menor pressió que l'altre monitor. Així doncs es corrobora que, per a poder realitzar un millor anàlisi de les zones on la pressió pren valors baixos, cal fer-ho amb pressions absolutes i, així, evitar problemes com el que ha succeït.

4.2.6. Resultats del parell motor

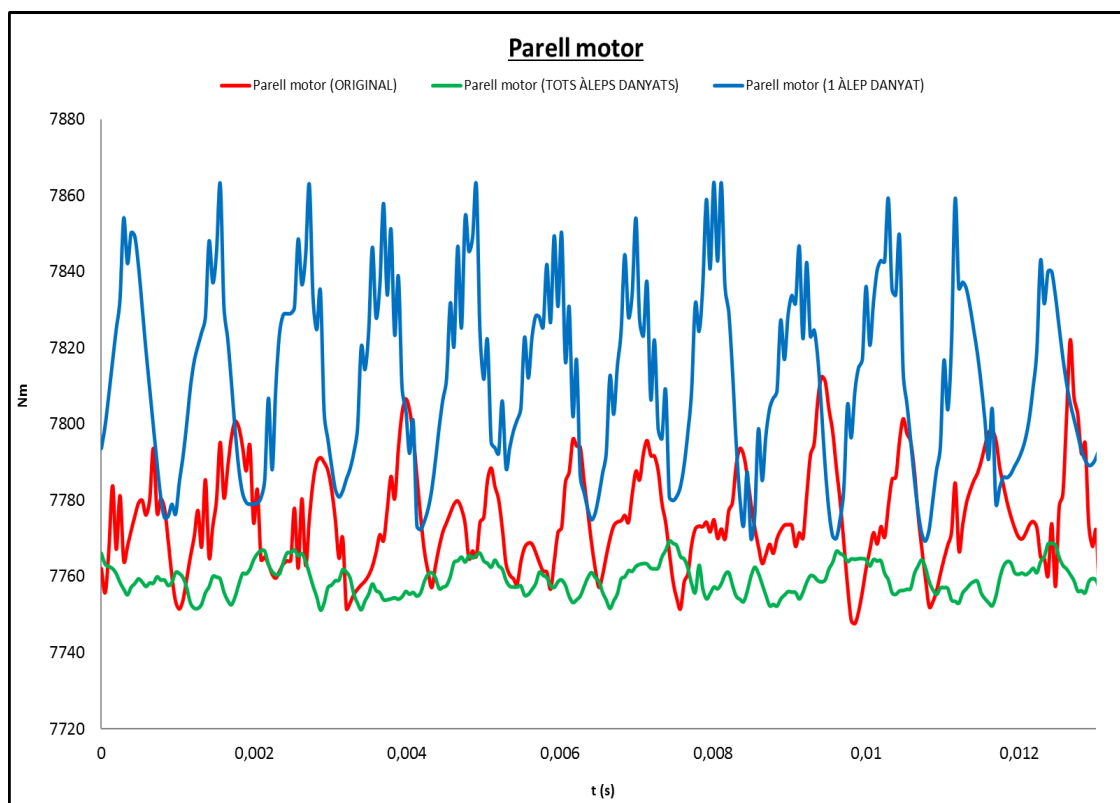


Figura 112. Valors de parell motor al rodet. -Font: Elaboració pròpia.

	Valor mig de parell motor al rodet (Nm)	Potència obtinguda (MW)
Geometria original	7.775,480	2,796
Geometria d'un àlep danyat	7.810,196	2,809
Geometria de tots els àleps danyats	7.759,169	2,791

Taula 46. Valors mitjans de parell motor al rodet i la potència subministrada. -Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 112 es poden apreciar les senyals de parell motor obtingudes a cada una de les simulacions. Els resultats de parell motor de la geometria original són els valors que es prenen com a referència per realitzar l'anàlisi.

S'aprecia com la geometria que genera més parell motor és la que conté un àlep malmès i, conseqüentment, és la que més potència subministra. El valor mitjà del parell augmenta, però la fluctuació es dobla. Aquest comportament és degut a que té un dany no simètric, cosa que provoca aquest augment de la fluctuació generant major vibracions a la turbina. Finalment, pel que fa als valors de la geometria tota malmesa, resulten els nombres més baixos de parell motor. Els valor de parell mitjà disminueix juntament amb la seva fluctuació, degut al dany simètric a la sortida del rodet.

4.2.6.1. Freqüències del parell motor

	Freqüències del parell motor (Hz)						
Original	916,6	1833,3	1203,1	401,0	802,1	1260,4	57,3
1 àlep danyat	918,6	401,9	1205,6	803,7	57,4	1837,1	1607,5
Tots àleps danyats	401,0	1833,3	802,1	1604,1	1203,1	2406,2	2807,2

Taula 47. Freqüències del parell motor. -Font: Elaboració pròpia.

Pel que fa a les freqüències obtingudes del parell motor del rodet, es pot veure com les primeres freqüències són les associades a les freqüències de pulsació de l'estator. S'observa com la primera freqüència de la geometria de tots el àleps danyats coincideix amb la freqüència de pulsació del rodet. De fet, s'aprecia com a totes les geometries comparteixen freqüències de pulsació del rodet i també de l'estator. Això torna a reafirmar l'existència de la interacció rotor-estator, donades les condicions de contorn, a entre els àleps de l'estator i els del rotor.

Conclusions

Com a reflexió final, es pot concloure que el present treball ha aconseguit l'objectiu que pretenia, doncs ha permès analitzar satisfactòriament la turbina d'estudi i obtenir deduccions a partir dels diversos tipus de danys analitzats.

Es poden extreure certes deduccions generals sobre el funcionament de la turbina que són comunes a les 3 simulacions.

Observant els valors obtinguts, es dedueix que, degut a la geometria cònica del rotor i el seu gir constant, es crea un gran vòrtex al centre del rodet, provocant un gran descens de la pressió en aquell punt i, per tant, una zona d'altres turbulències que coincideix amb una zona susceptible de patir cavitació. D'altra banda, es demostra que, efectivament existeix cavitació a les puntes dels àleps, per la qual cosa es pot afirmar que aquests estan sotmesos a una erosió constant i, forats com els que s'han recreat per realitzar l'estudi podrien arribar a produir-se en la realitat.

Partint dels resultats de pressió i velocitat obtinguts a les cares interiors dels àleps, es dedueix que, en aquesta zona, té lloc el principi de Bernoulli, el qual comporta baixes pressions a les zones de majors velocitats.

D'altra banda, a partir de la comparativa de resultats de les 3 simulacions, es poden concloure diverses afirmacions.

Pel que fa a les pressions originades, aquestes resulten ser, a nivell global, majors en els dos casos en què els àleps del rotor estan danyats, formant patrons diferents si es comparen amb l'original.

Respecte a les velocitats que es donen en cadascuna de les 3 geometries es comprova que aquelles que presenten danys als àleps sofreixen un descens significatiu de la velocitat a la zona afectada, fet que es dedueix que es deu al canvi brusc de geometria a la punta. En el cas d'un àlep trencat aquesta variació resulta més dràstica que en la de tots els àleps trencats.

En quant a les turbulències es pot afirmar que la geometria on aquestes es fan més notòries és a la d'un àlep trencat. Es pot deduir que aquest fet es deu a que el fluid es distribueix de forma no uniforme degut a què el dany es troba únicament en un àlep, en contraposició a la resta de geometries on la distribució és més uniforme. Cal destacar també l'evident variació de turbulència a la punta dels àleps, doncs a la geometria original, la turbulència és inexistente i, en canvi en els altres casos la turbulència es fa patent, sobretot a la geometria que conté un àlep malmès.

Per tot això, es conclou que, efectivament la geometria original suporta menys esforços i les altres dues geometries són més propenses a seguir desgastant-se cada cop més. De la mateixa manera, es conclou

que, d'entre les dues geometries que contenen danys al rodet, la que correspon a un àlep trencat és més susceptible al desgast a causa de tenir un dany no simètric.

La conclusió o recomanació que es pot extreure de l'anàlisi dels monitors és que, a l'hora de realitzar simulacions amb l'*Ansys CFX*, s'han d'utilitzar pressions absolutes en comptes de relatives en aquells punts on s'originen pressions molt baixes, ja que en cas contrari, pot retornar valors físicament impossibles. Per tant, resulta crucial, adoptar una posició crítica a l'hora de validar els resultats. Es pot afirmar que el monitor E3 correspon als valors més alts de pressió, seguit del monitor IF5 que coincideix amb la zona més propera a la zona de la *Interface* rotor-estator.

De l'anàlisi de les freqüències dels monitors es conclou que té lloc el fenomen de l'RSI, el qual comporta desgast a les puntes dels àleps a l'entrada del rodet, així com a l'eix de la turbina degut a les vibracions produïdes.

Per acabar, tot i que es podria pensar que la geometria d'un àlep trencat pot aportar avantatges pel que fa a l'energia generada doncs és la que subministra major potència, es conclou que no és així. El dany no simètric del rodet, provoca que la fluctuació es dobli generant vibracions indesitjables. Per tant, en comparar els valors del parell motor i posar-los en contra posició a la fluctuació observada, es reafirma, tal com s'esperava, que la geometria original té un funcionament més òptim. De cara a futurs estudis de turbines semblants, es podrien tenir en compte els patrons de fluctuació observats al parell motor d'aquest estudi, per tal d'intentar predir possibles defectes similars.

Pressupost

Cost software			
Concepte	Temps (h)	Preu (€/h)	Preu (€)
Llicència ANSYS	340	5,13	1.744
Llicència SolidWorks	20	0,6	12
Total			1.756,20 €
Cost hardware			
Concepte	Temps (h)	Preu (€/h)	TOTAL (€)
Càlcul de la primera simulació (CPU)	120	0,25	30
Càlcul de la segona simulació (CPU)	180	0,25	45
Total			75,00 €
Cost associat al desenvolupament del projecte			
Concepte	Temps (h)	Preu (€/h)	TOTAL (€)
Confecció geometries malmeses	25	28	700
Elaboració de les malles	20	30	600
Configuració de les simulacions	57	30	1710
Anàlisi dels resultats obtinguts	50	30	1500
Elaboració de la documentació	125	30	3750
Total			8.260,00 €
<p>■ Cost software ■ cost hardware ■ Cost projecte</p>		Subtotal	10.091,20 €
		IVA 21%	2.119,15 €
		TOTAL PRESUPOST	12.210,35 €

Bibliografia

- {1} Mundet, Agustí. Numerical simulation of cavitation in a Francis runner under different operating conditions. Tesis de Màster, UPC, Departament de Mecànica de fluids, 2018.
- {2} Pérez Bermejo, Daniel. Estudi del comportament d'una turbina Francis amb àleps directrius desalineats. Tesis de grau, UPC, Departament de Mecànica de fluids, 2019.
- {3} White, Frank M. *Mecánica de fluidos*. Madrid: McGraw Hill, 2004. ISBN 124636147.
- {4} Ansys, Inc. *Introduction to ANSYS CFX*. 23 de Mayo de 2016.
- {5} Fontanals, Alfred. Caracterització del flux a causa de la interacció rotor-estator en turbomàquines mitjançant CFD. Tesis doctoral, UPC, Departament de Mecànica de fluids, 2012.
- {6} Escaler, Xavier, et al. "Detection of cavitation in hydraulic turbines." *Mechanical systems and signal processing* 20.4 (2006): 983-1007.
- {7} Kumar, Pardeep, and R. P. Saini. "Study of cavitation in hydro turbines—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.1 (2010): 374-383.
- {8} Natanasabapathi, S., and J. Kshirsagar. "Pump As Turbine-An Experience With CFX-5.6." Corporate research and engineering division. Pune, India, Kirloskar Bros. Ltd (2004).
- {9} DING, Ling-yun, et al. "Application CFX-BladeGen in modelling turbine blade [J]." *Journal of Engineering Design* 2 (2005).
- {10} Laín, Santiago, et al. "CFD Numerical simulations of Francis turbines." *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 51 (2010): 24-33.
- {11} Fontanals, Alfred. Pijoan, Roger. Guardo, Alfredo. Coussirat, Miguel G. Efectos de la obstrucción del flujo en una turbina. *Mecánica Computacional*. Noviembre 2016, Vol XXXIV, p. 2037-2043.
- {12} Egusquiza, Eduard. Valero, Carme. Estévez, Aida. Guardo, Alfredo. Coussirat, Miguel. Failures due to ingested bodies in hydraulic turbines. Septiembre 2010. *Engineering Failure Analysis*. No. 18, p. 464-473. ISSN 1350-6307.
- {13} Ayuso, Pedro y Mauro, Jorge. (2004). Detección de cavitación en turbina Francis [En línea]. [Consulta 17 de juliol de 2019]. Disponible en: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/2632>>

- {14}** Trigueros Moreno, Pablo. Estudio con CFD del comportamiento de una turbina Francis con daños en la entrada del rotor. Tesis de grau, UPC, Departament de Mecànica de fluids, 2019.
- {15}** Velocity Boundary Layer. [En línia]. [Consulta 24 de gener de 2020]. Disponible en: <<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/boundary-layer/velocity-boundary-layer-thermal-boundary-layer/>>
- {16}** Schobeiri, Meinhard T. *Turbomachinery Flow Physics and Dynamic Performance*. Londres: Springer, 2012. ISBN 978-3-642-24672-6.
- {17}** Roache, P. J. (1998). *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Vol. 41. Hermosa Publishers.
- {18}** Principio de Bernoulli. [En línia]. [Consulta 24 de gener de 2020]. Disponible en: <<https://www.experimentoscientificos.es/experimento-vuelan-los-aviones/>>
- {19}** Zobeiri, A., Kueny, J. L., Farhat, M. y Avellan, F. (2006). Pump turbine rotor-stator interactions in generating mode: pressure uctuations in distributor channel. En: 23th IAHR symposiums. IAHR, Yokohama.
- {20}** Defining Lift and Drag. [En línia]. [Consulta 24 de gener de 2020]. Disponible en: <<https://www.comsol.com/blogs/how-do-i-compute-lift-and-drag/>>
- {21}** Yabuki, A., Matsuwaki, K. y Matsumura, M. (1999). Critical impact velocity in the solid particles impact erosion of metallic materials. *Wear*, Vol. 233-235, Págs. 468-475. ISSN 0043-1648.
- {22}** Ansys (2006a). *Discretization and Solution Theory*, ANSYS CFX Release 11.0. ANSYS Inc.
- {23}** Ansys (2006a). *Particle Transporte Theory*, ANSYS CFX Release 11.0. ANSYS Inc.
- {24}** Avellan, F. (2000). Flow investigation in a francis draft tube: the FLINDT project. En: *Proceedings 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and System*, Vol. 1. Charlotte.
- {25}** Bernad, S., Susan-Resiga, R. F., Muntean, S. y Anton, I. (2004). Numerical simulation of two-phase cavitation fow in turbomachines. En: *6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamis*, Págs. 10-12. Timisoara.
- {26}** QDC Revelstoke unit 5, Francis turbine with generator, Voith SIEMENS [En línia]. [Consulta 12 de març de 2020]. Disponible en: <<https://gdc.design/danielleduranleau/work/3110>>

- {27}** Francis Turbine with generator. [En línia]. [Consulta 21 de juliol de 2019]. Disponible en: <https://gdc.design/danielleduranleau/work/3110>
- {28}** Fernandez Díaz, Pedro. Turbinas Francis [En línia]. [Consulta 02 de febrer de 2020]. Disponible en: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf> >
- {29}** CFD Online. "Turbulence intensity" [En línia]. [Consulta 11 de juny de 2019]. Disponible en: http://www.cfdonline.com/Wiki/Turbulence_intensity. >
- {30}** Ansys Guide. "Ansys Meshing User's Guide" [En línia]. [Consulta 07 de agost de 2019]. Disponible en: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Meshing%20Users%20Guide.pdf>. >
- {31}** CFD Online. "Lift and drag" [En línia]. [Consulta 20 de juny de 2019]. Disponible en: http://www.cfdonline.com/Wiki/Lift_and_drag. >
- {32}** Rutes Pirineus. Carrilet de l'estany Gento a la Vall Fosca [En línia]. [Consulta 10 de juny de 2019]. Disponible en: www.rutespirineus.cat/fotografies/carrilet-estany-gento-vall-fosca.
- {33}** Hidráulica [En línia]. [Consulta 10 de juny de 2019]. Disponible en: [https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/las-fuentes/hidraulica/.](https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/las-fuentes/hidraulica/) >
- {34}** American Hydro. Products [En línia]. [Consulta 10 de juny de 2019]. Disponible en: www.ahydro.com/products
- {35}** Water turbines and hydro-mechanical equipments [En línia]. [Consulta 11 de juny de 2019]. Disponible en: <https://strojirnybrno.com/en/vodni-turbiny/pelton/>
- {36}** Fundamentos de las turbomáquinas [En línia]. [Consulta 11 de juny de 2019]. Disponible en: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/04/fundamentos-de-las-turbomaquinas/>
- {37}** Turbinas Francis [En línia]. [Consulta 17 de juliol de 2019]. Disponible en: <https://faeitch2012.wordpress.com/2012/02/29/turbinas-francis/>
- {38}** Laminar Flow vs. Turbulent Flow. [En línia]. [Consulta 21 de gener de 2020]. Disponible en: <https://www.reactor-physics.com/engineering/fluid-dynamics/laminar-flow-vs-turbulent-flow/>

Annex A

A continuació es mostrarà tots aquells resultats que no s'han inclòs a la memòria.

A1. Resultats gràfics no inclosos a la memòria

En aquest apartat s'inclouran totes les imatges de contorns, vectors, etc que no s'han incorporat a la memòria.

A1.1. Geometria original

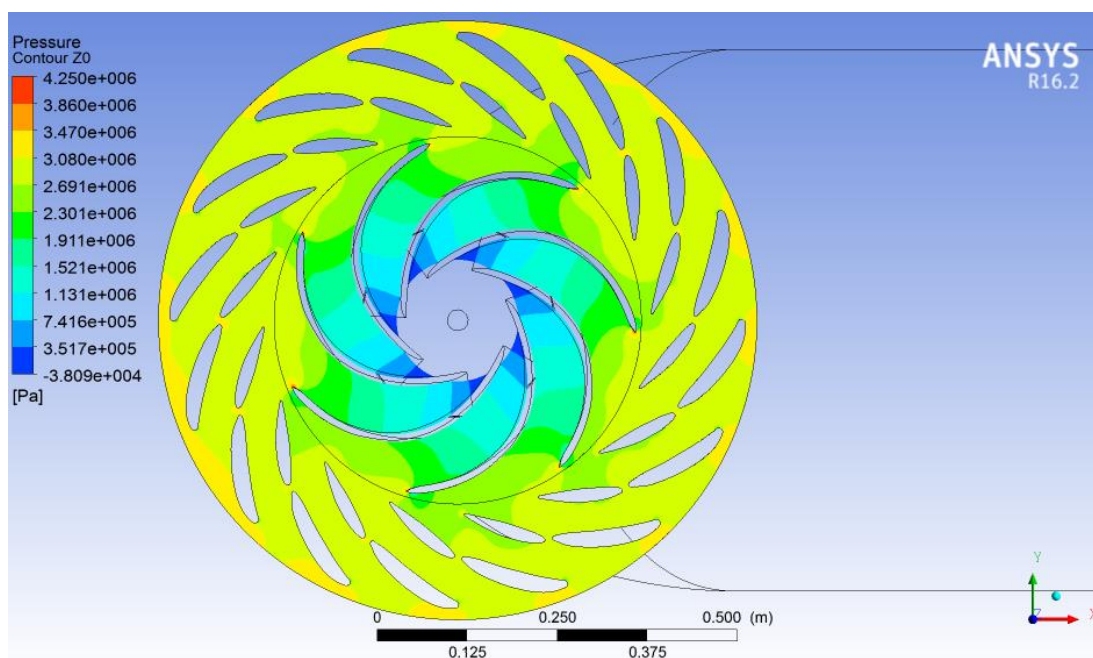


Figura 113. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

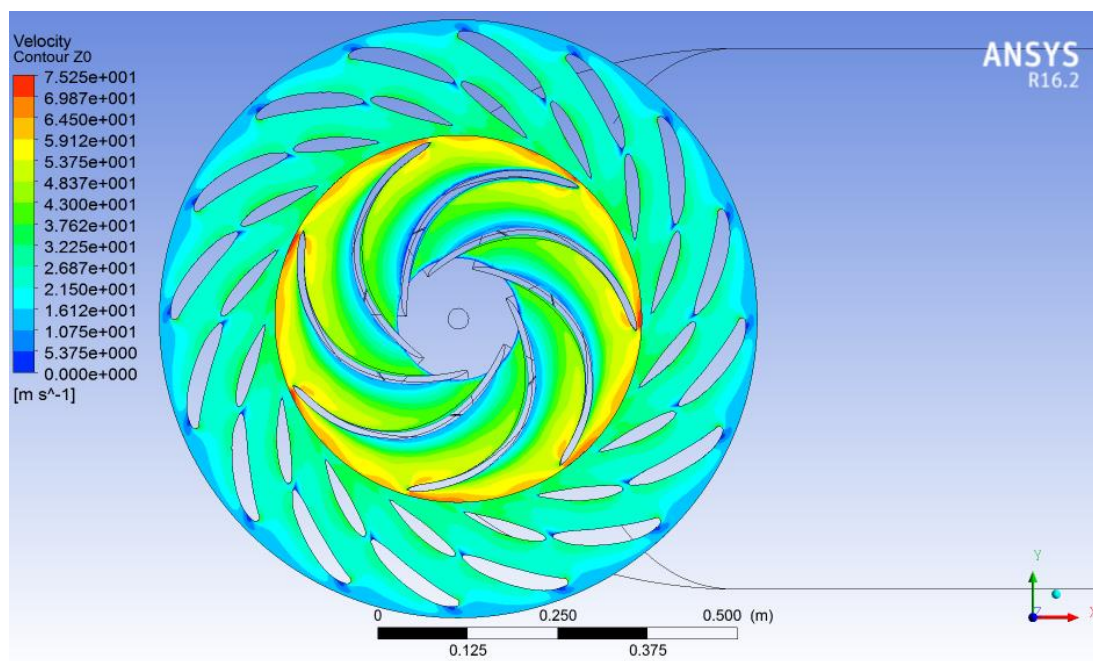


Figura 114. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

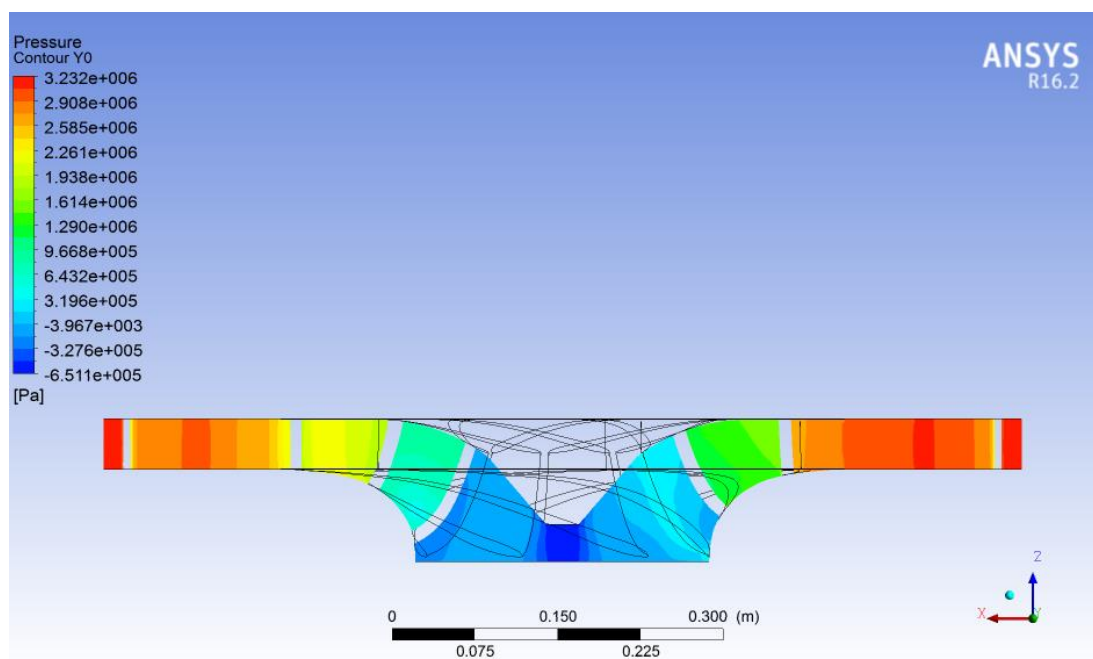


Figura 115. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

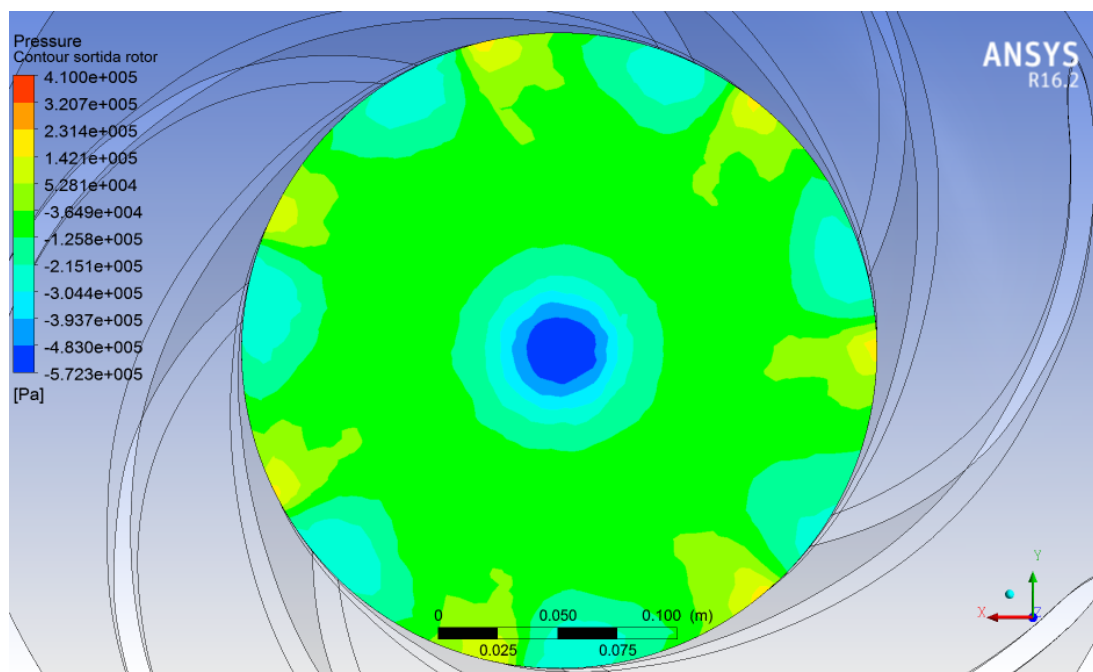


Figura 116. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

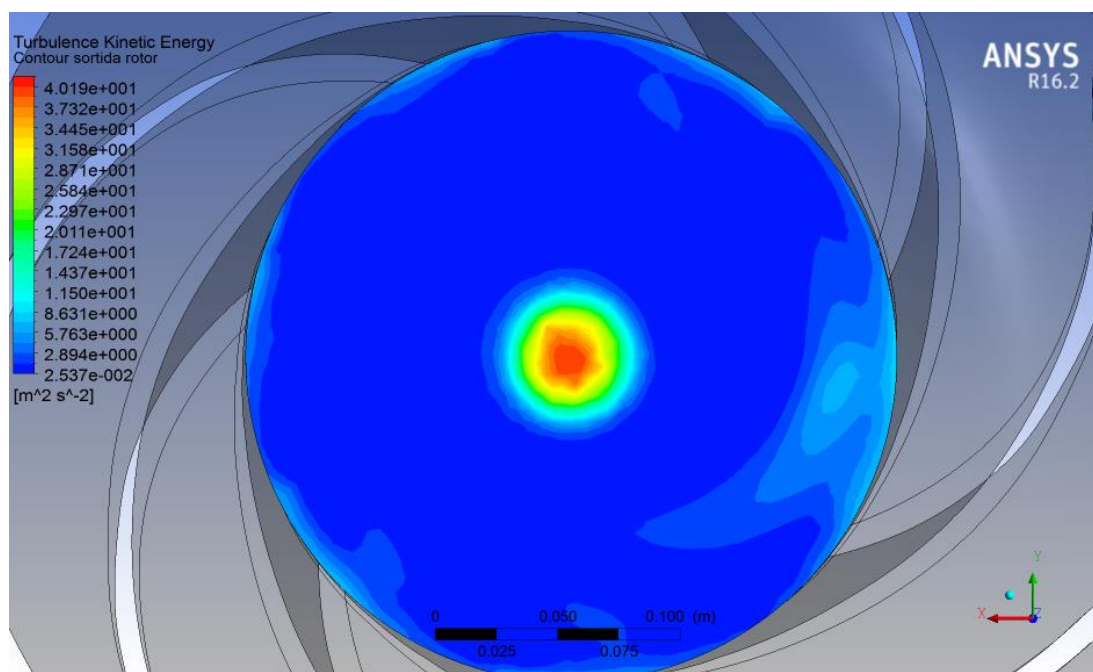


Figura 117. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

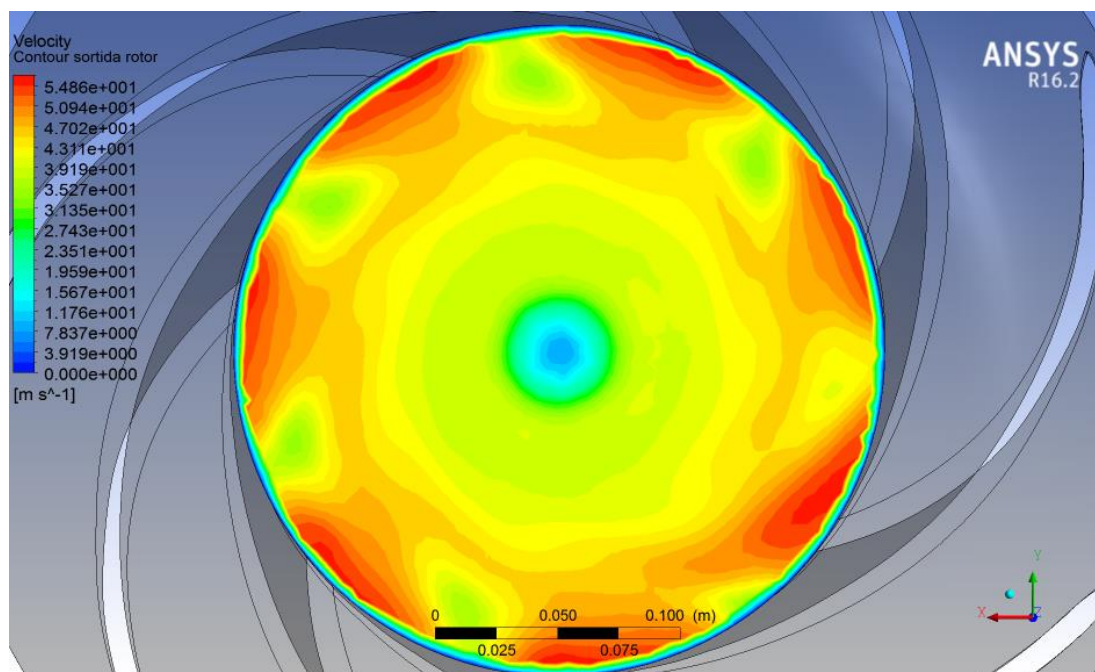


Figura 118. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

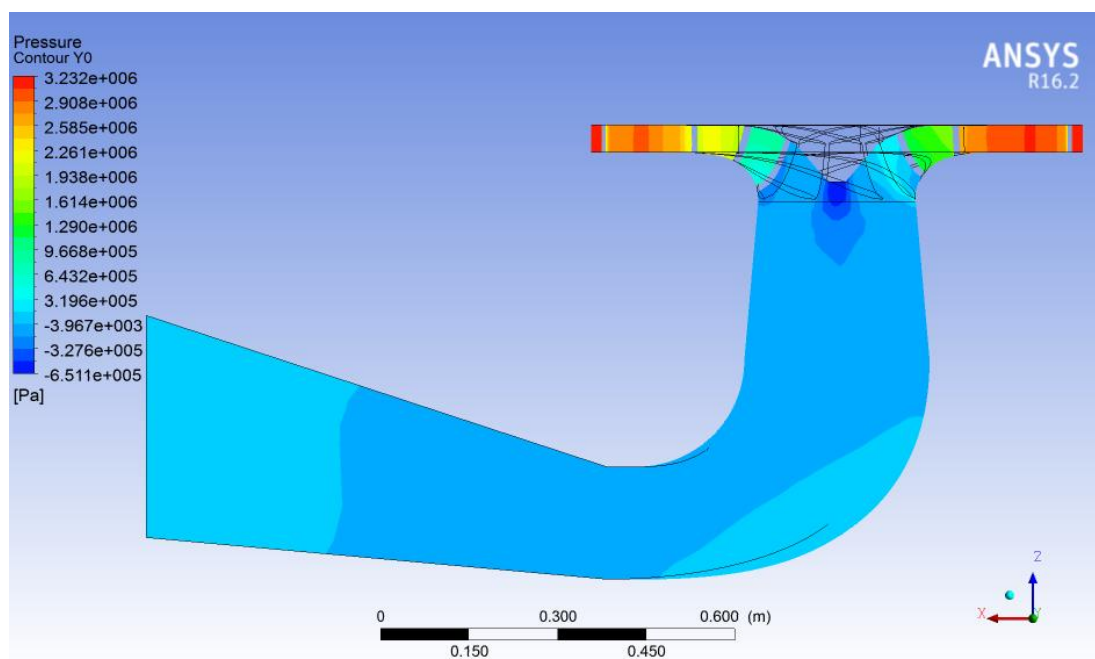


Figura 119. Contorn de pressió del sistema (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

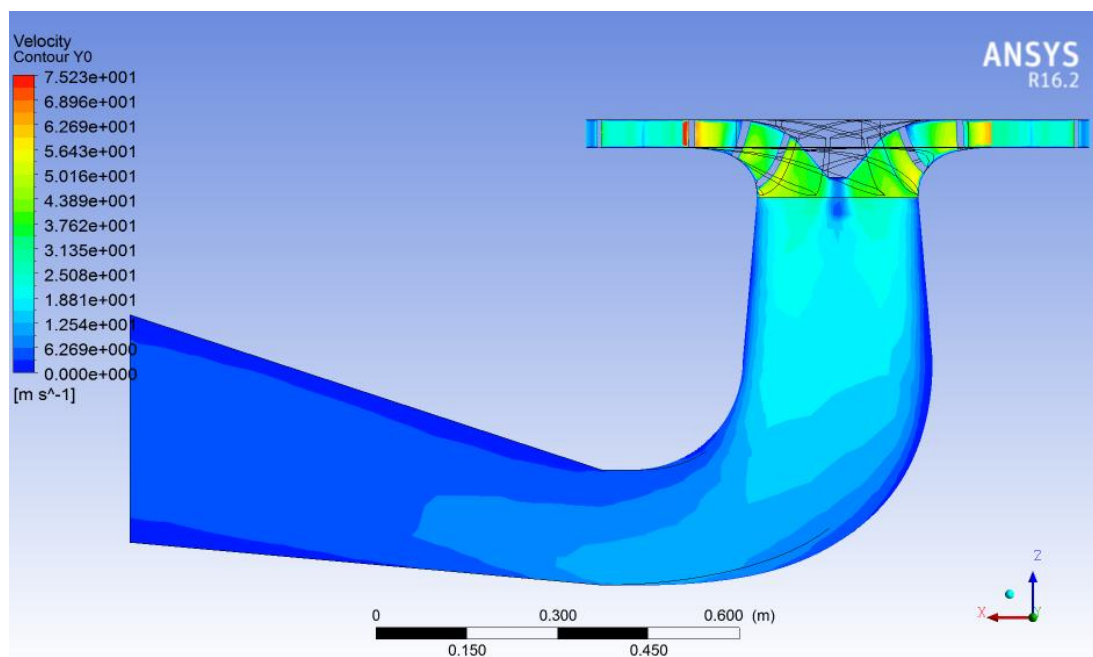


Figura 120. Contorn de velocitat del sistema (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A1.2. Geometria amb un àlep danyat

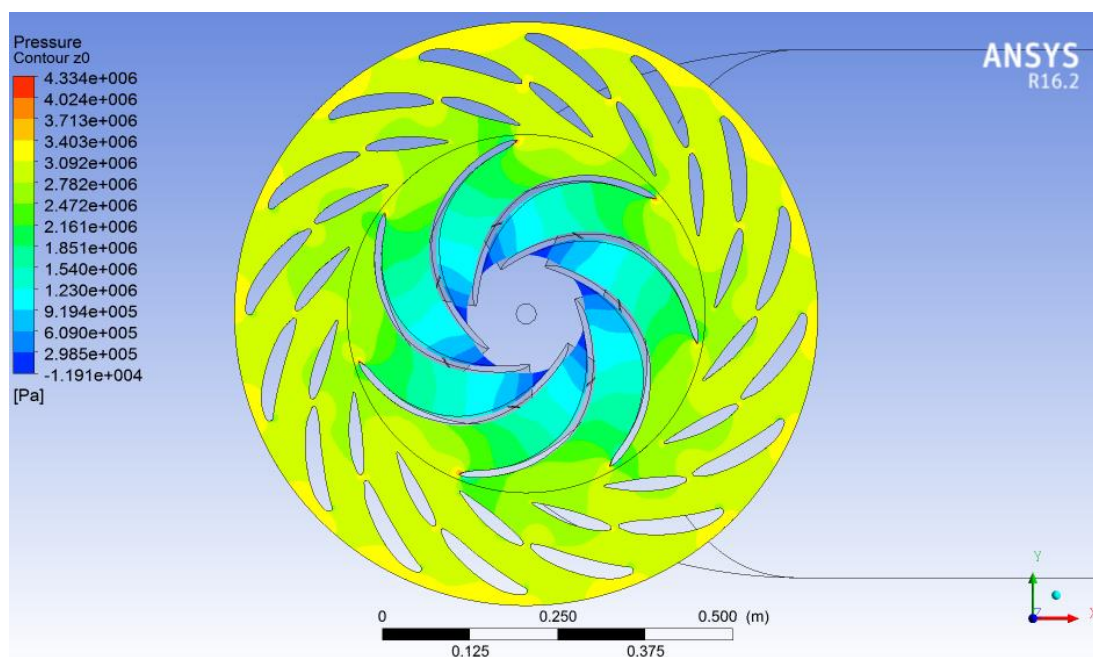


Figura 121. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

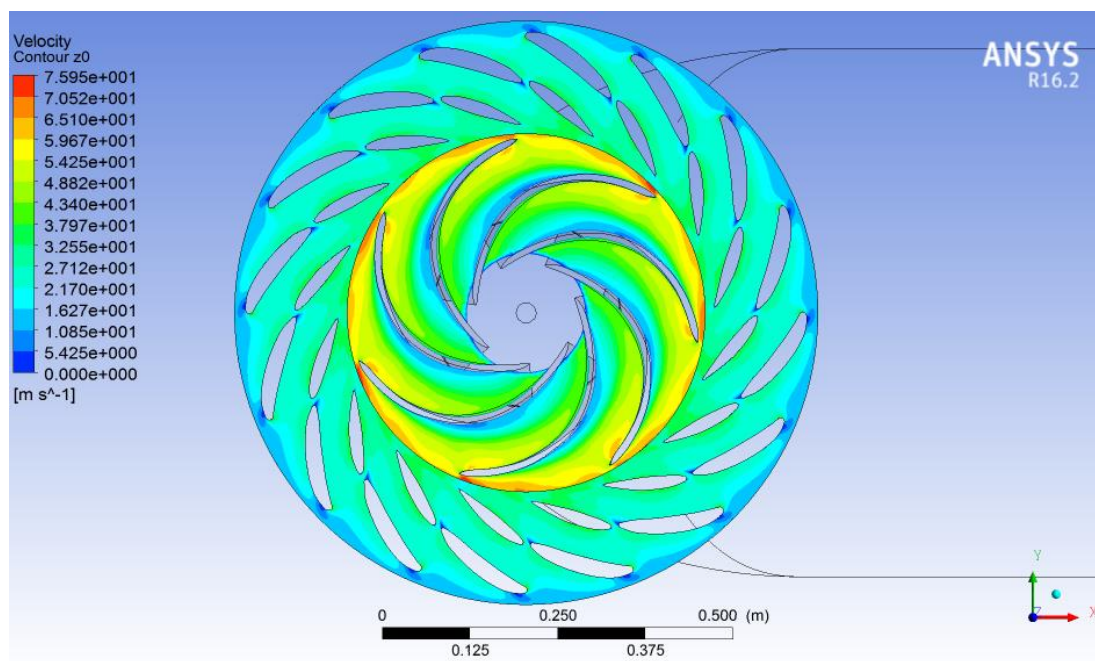


Figura 122. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

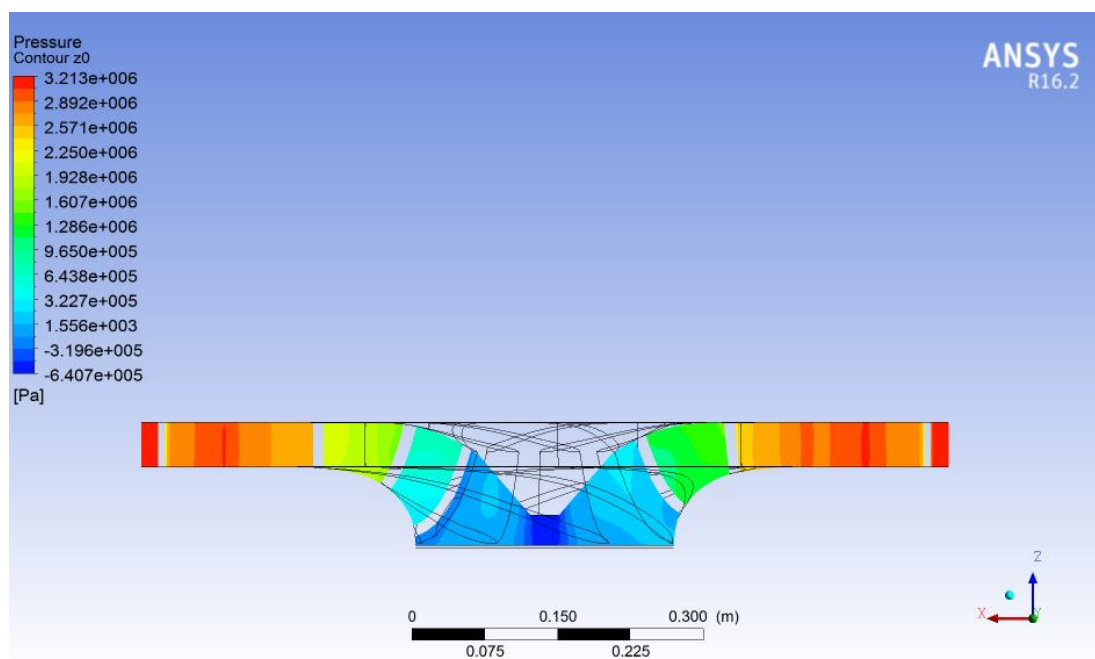


Figura 123. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

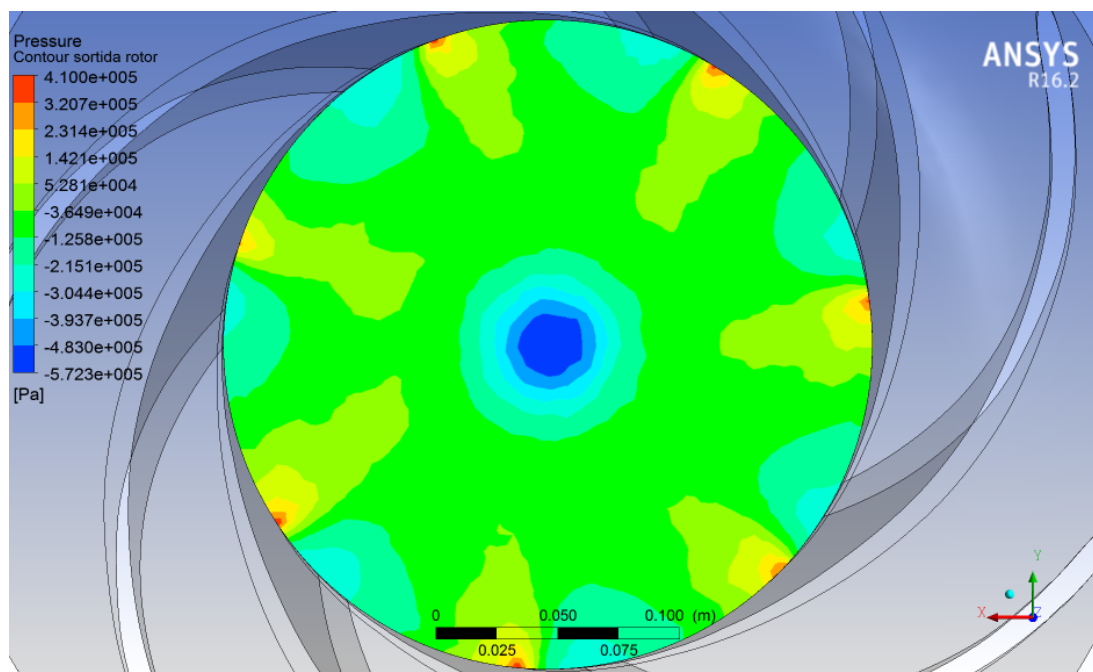


Figura 124. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

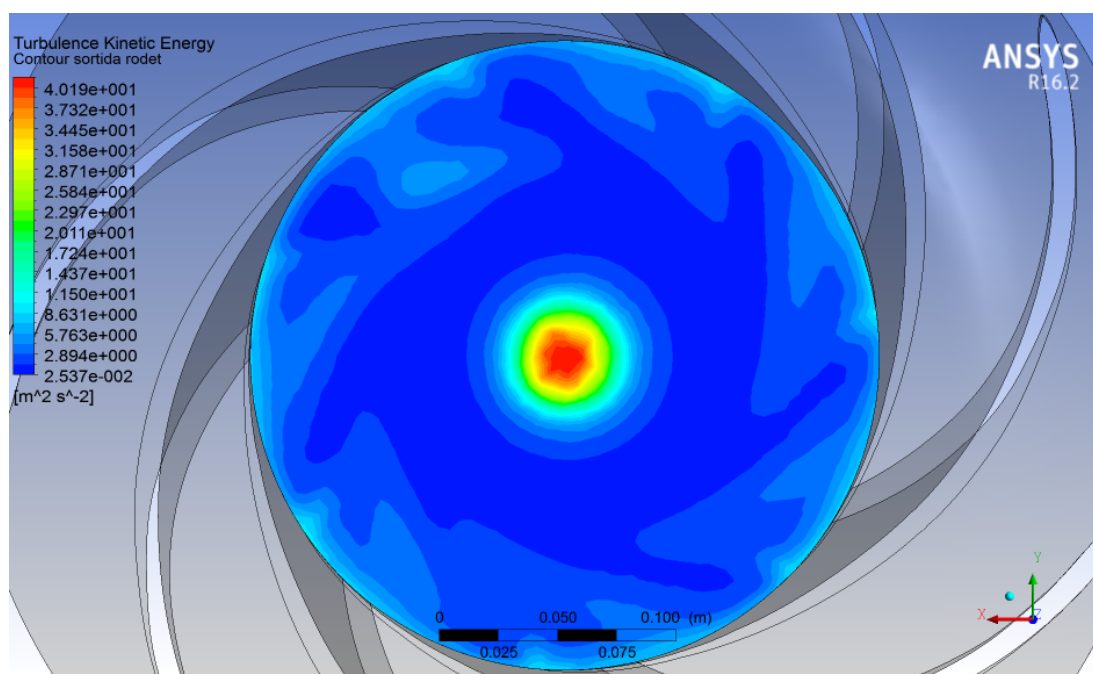


Figura 125. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

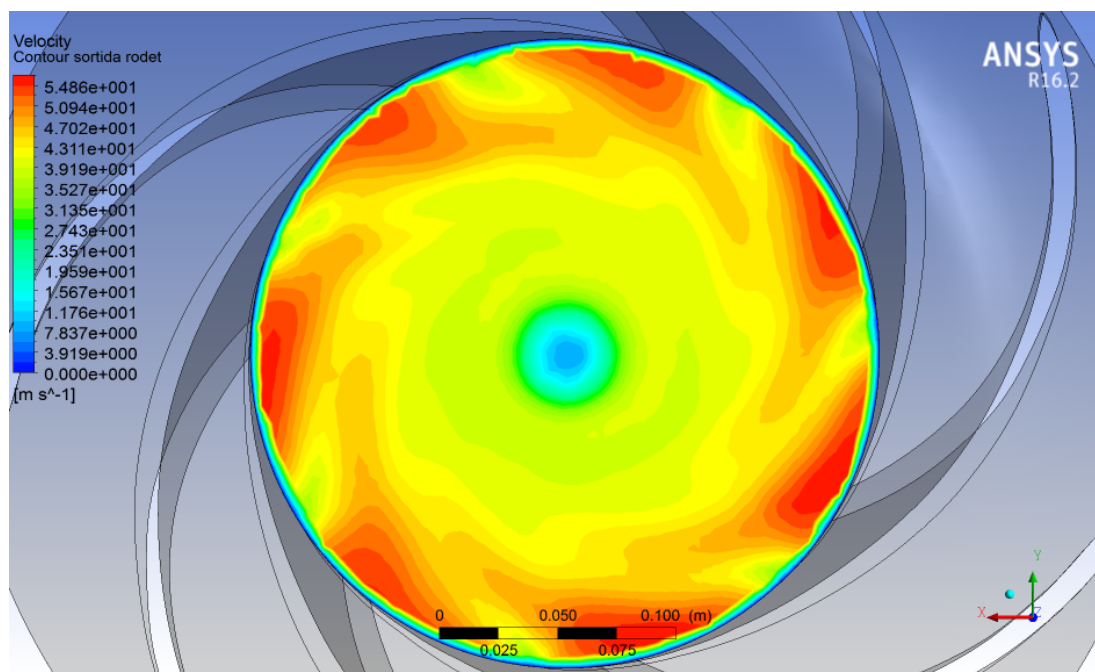


Figura 126. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

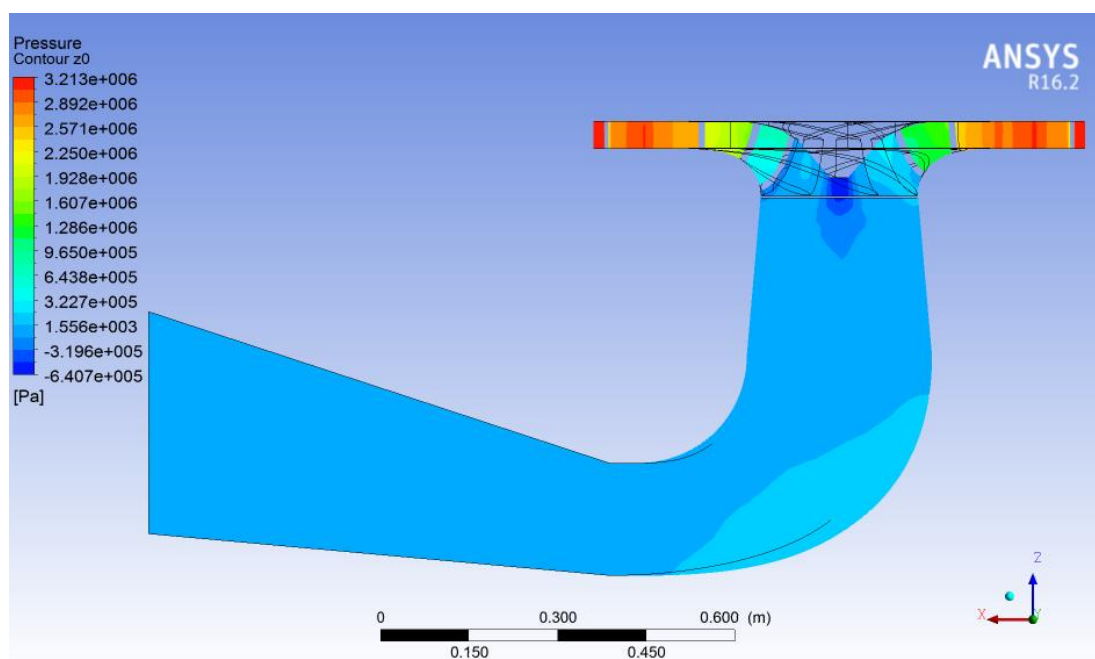


Figura 127. Contorn de pressió del sistema (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

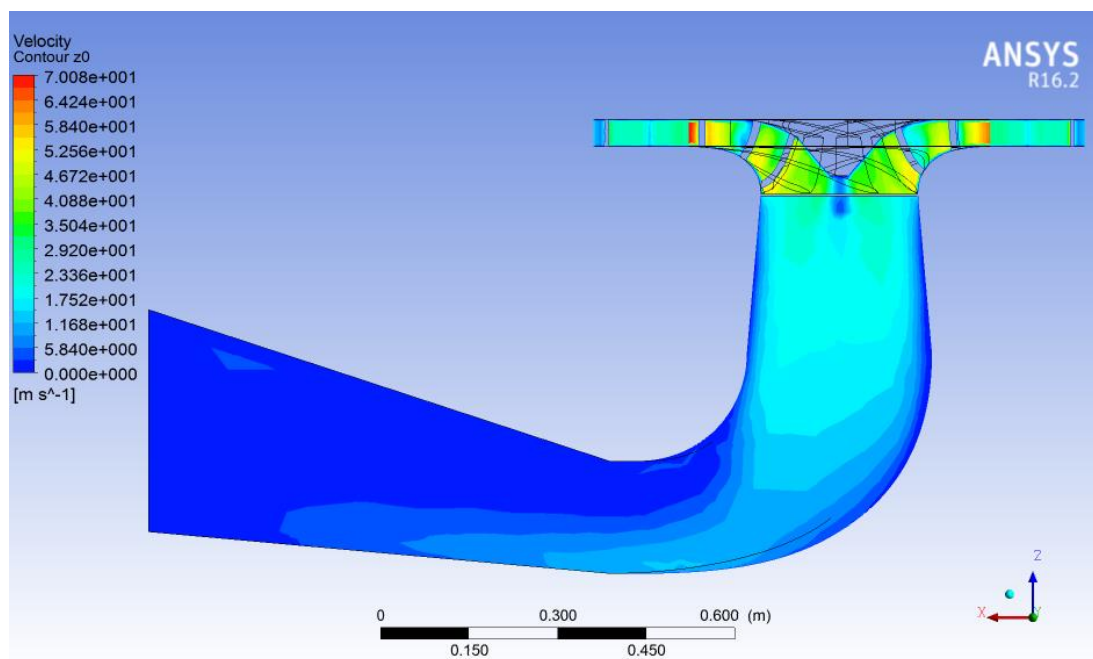


Figura 128. Contorn de velocitat del sistema (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A1.3. Geometria amb tots els àleps danyats

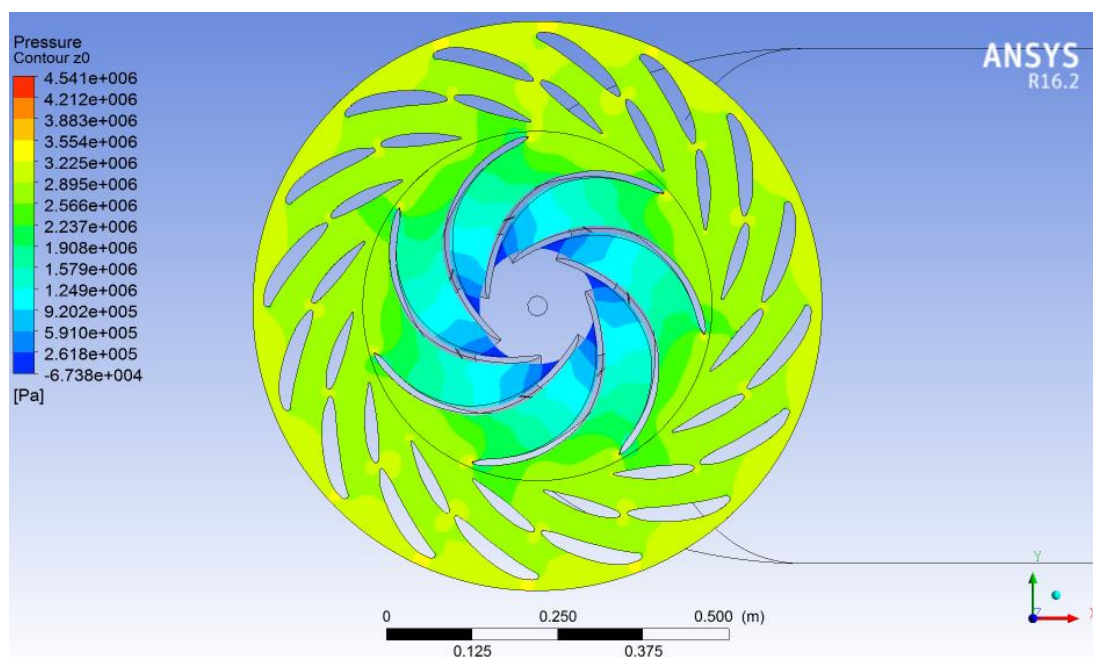


Figura 129. Contorn de pressió del rotor-estator (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

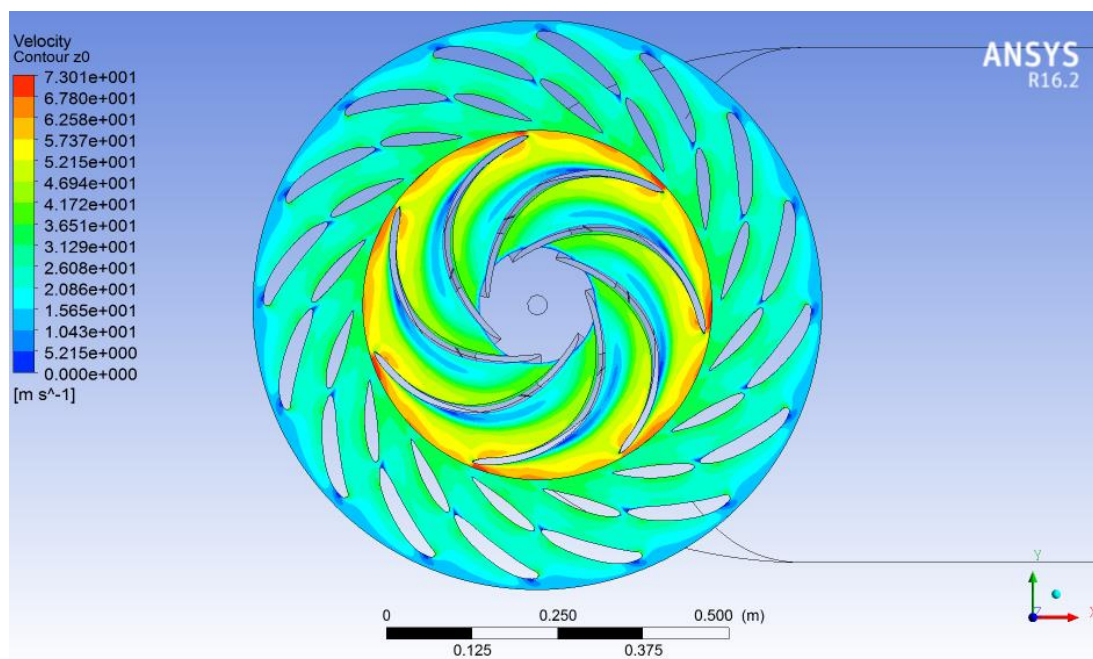


Figura 130. Contorn de velocitat del rotor-estator (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

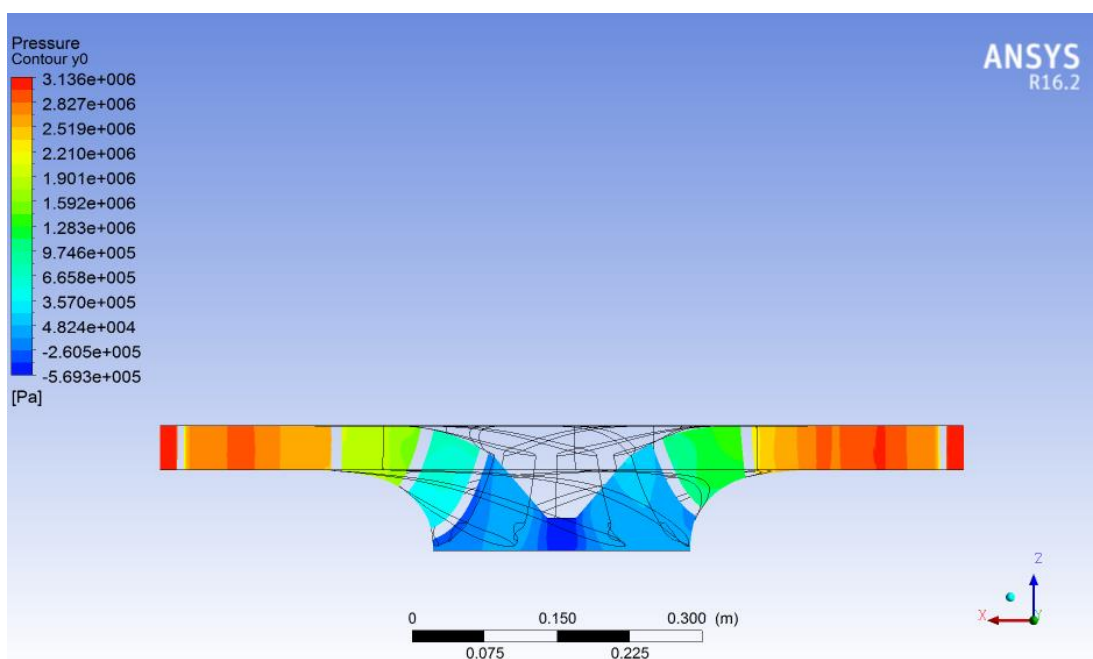


Figura 131. Contorn de pressió del rotor-estator (pla Y0) (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

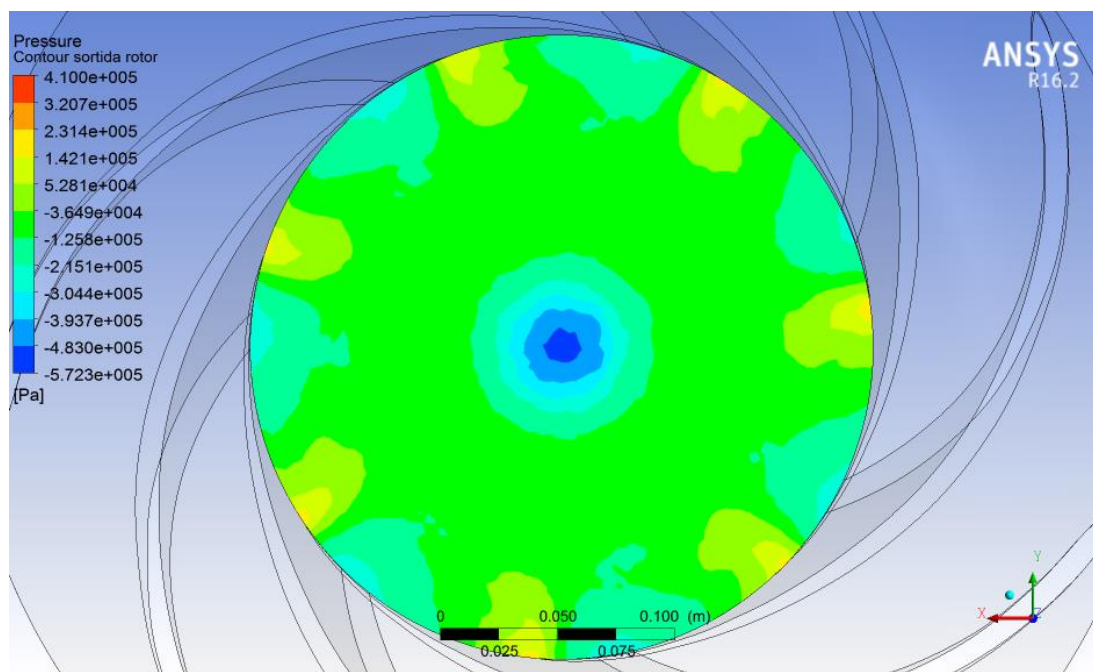


Figura 132. Contorn de pressió a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

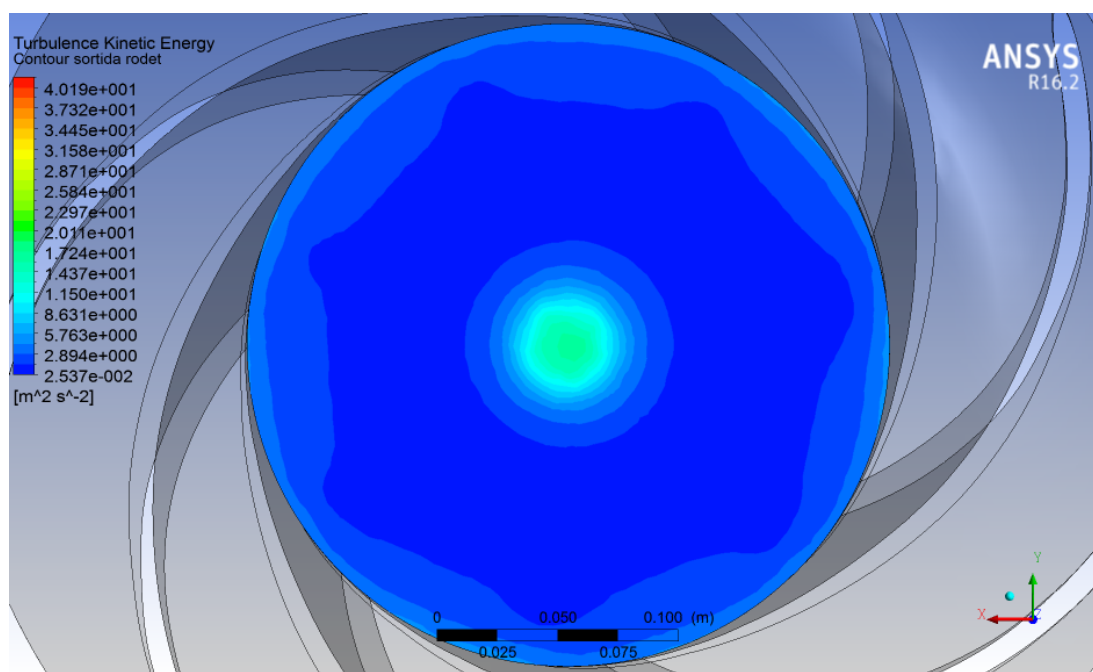


Figura 133. Contorn de turbulència a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

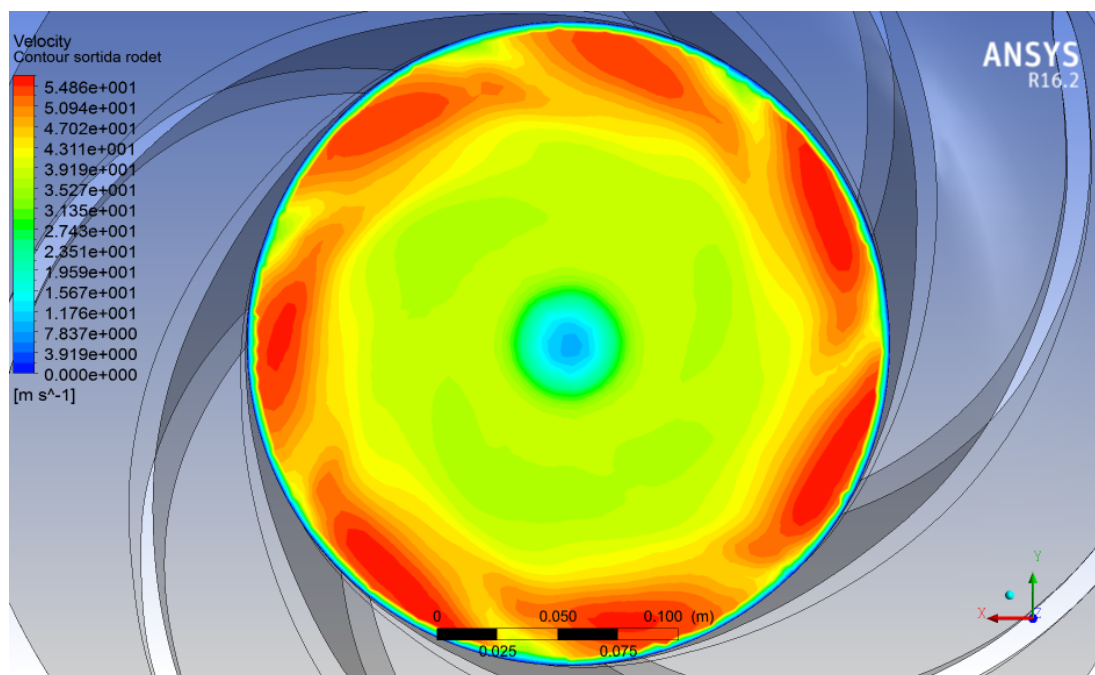


Figura 134. Contorn de velocitat a la sortida del rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

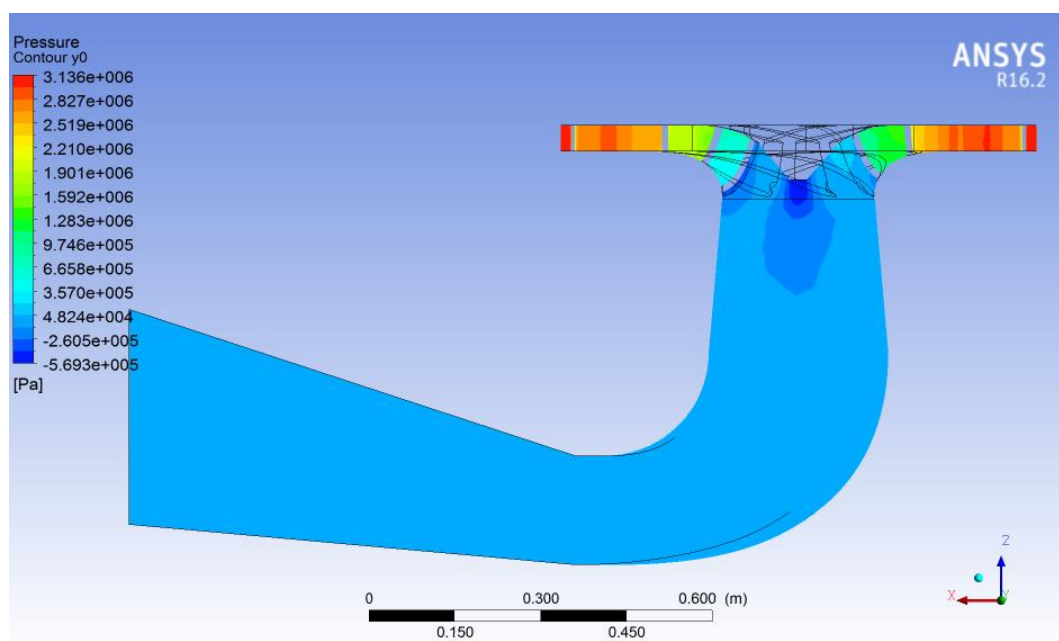


Figura 135. Contorn de pressió del sistema (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

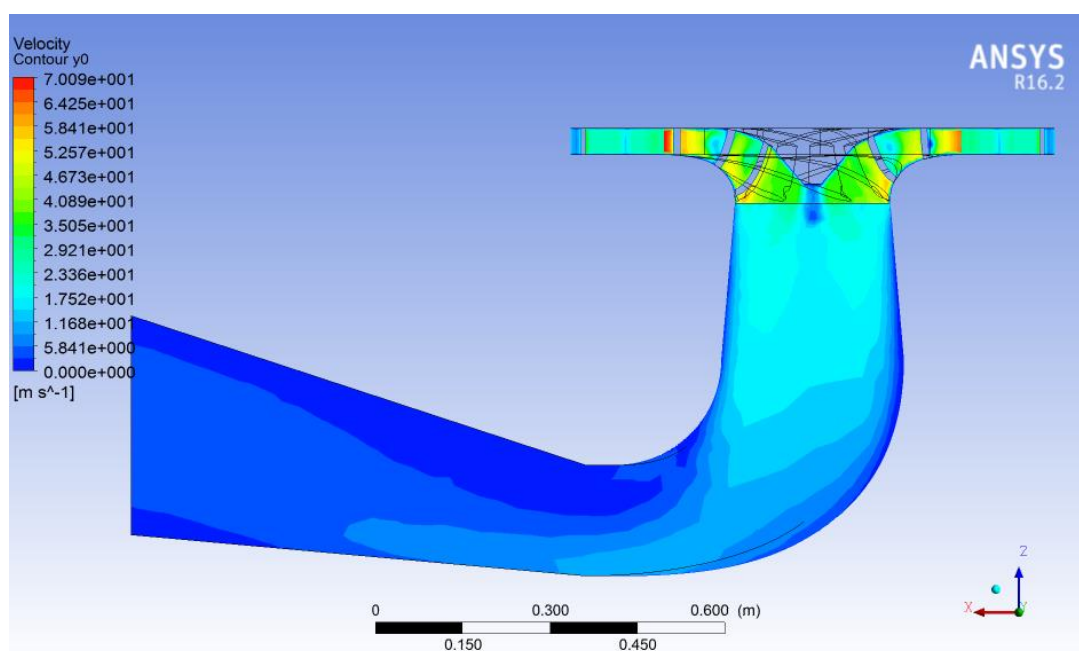


Figura 136. Contorn de velocitat del sistema (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Ansys CFX.

A2. Resultats monitors

En aquest apartat es mostraran les gràfiques de les freqüències per cada monitor.

A2.1. Geometria original

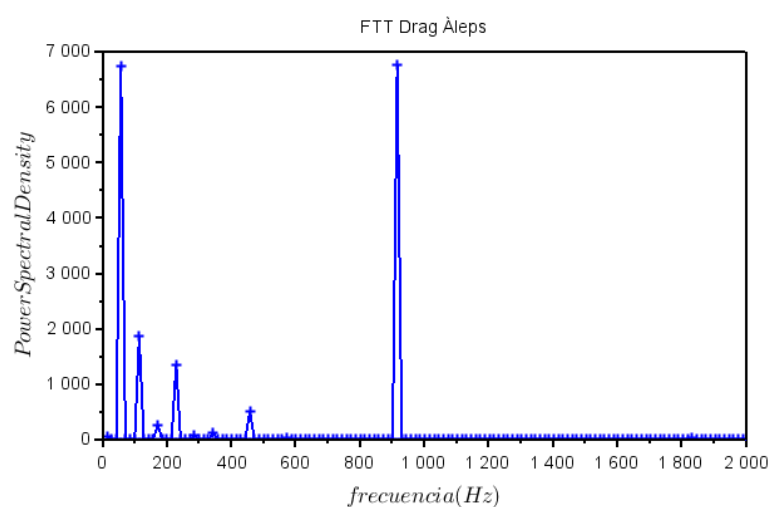


Figura 137. Freqüències del monitor Drag als àleps (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

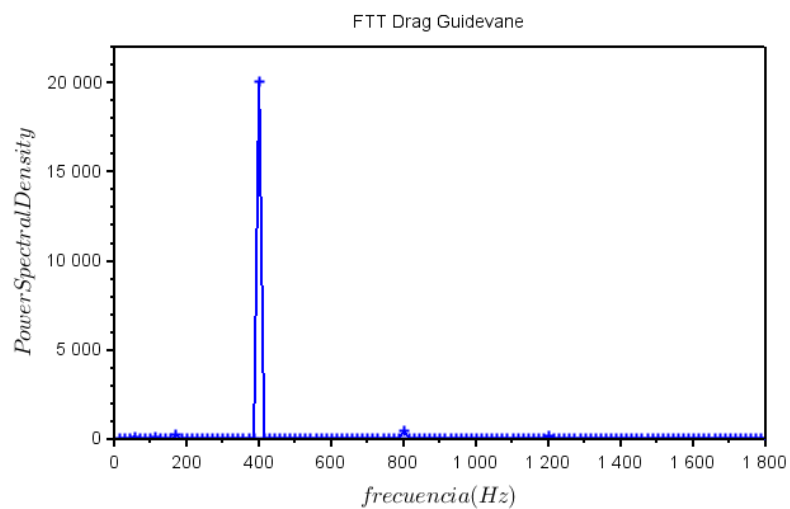


Figura 138. Freqüències del monitor Drag guidevanes (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

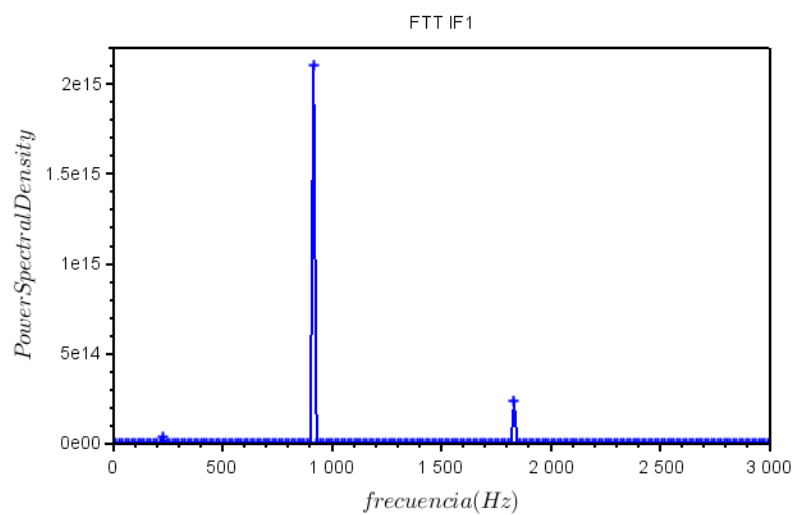


Figura 139. Freqüències del monitor IF1 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

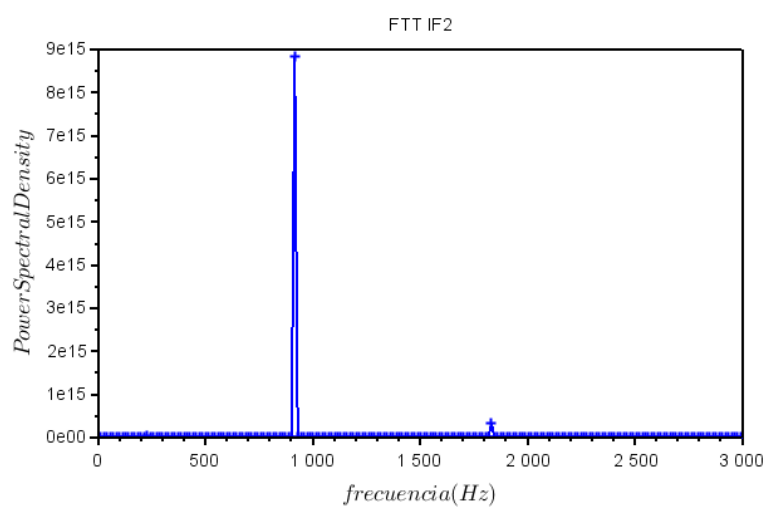


Figura 140. Freqüències del monitor IF2 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

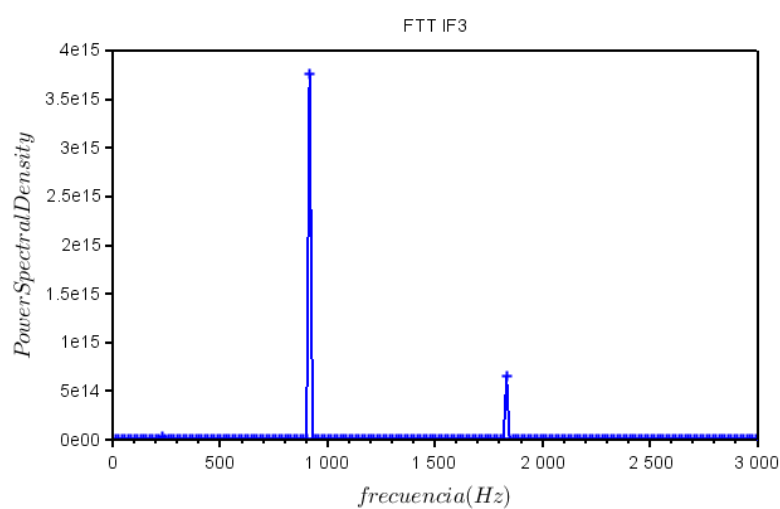


Figura 141. Freqüències del monitor IF3 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

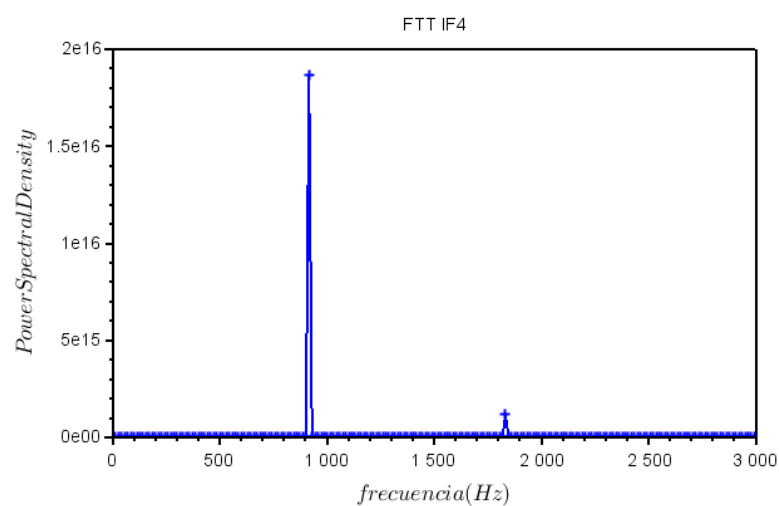


Figura 142. Freqüències del monitor IF4 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

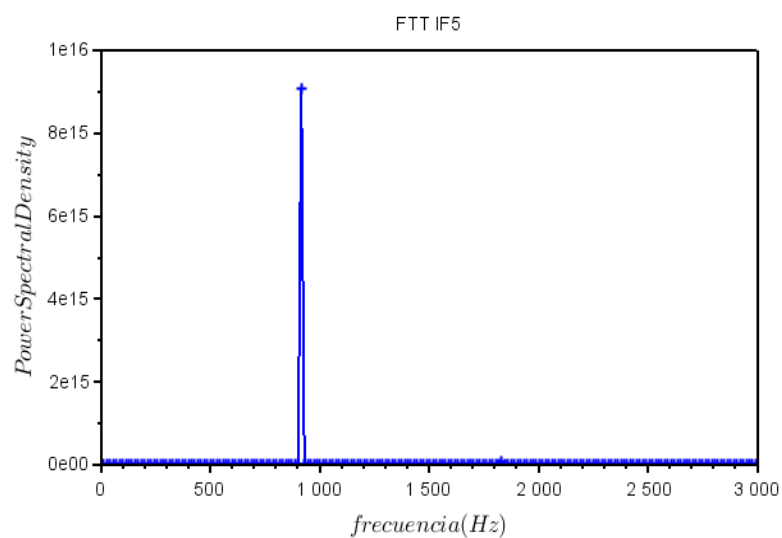


Figura 143. Freqüències del monitor IF5 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

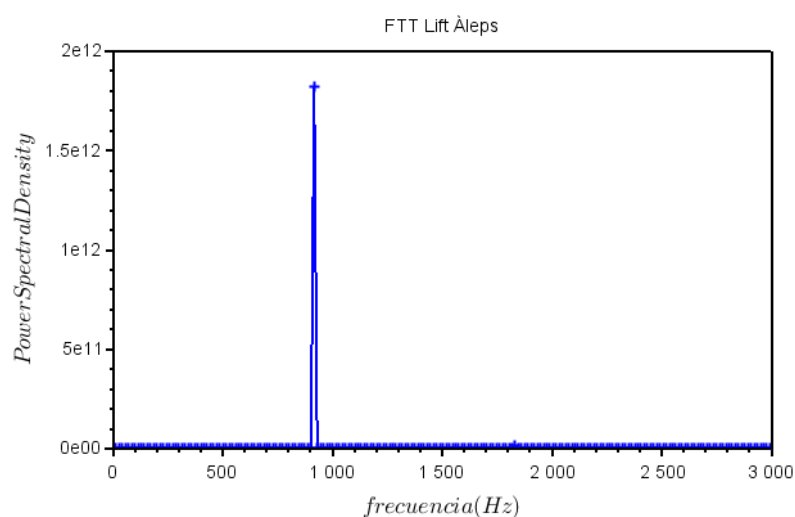


Figura 144. Freqüències del monitor Lift àleps (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

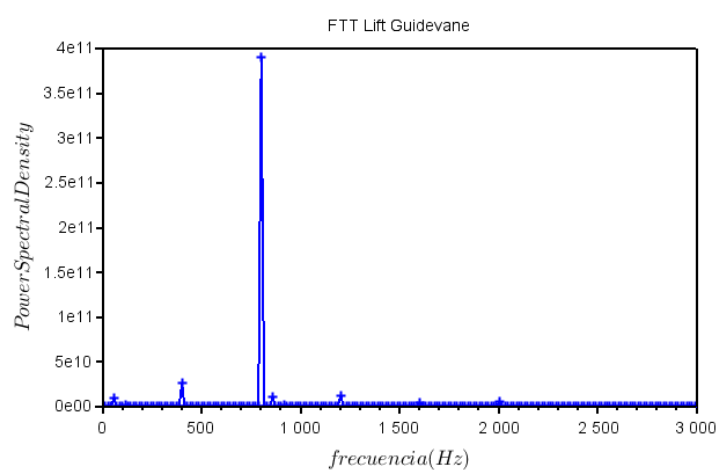


Figura 145. Freqüències del monitor Lift guidevanes (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

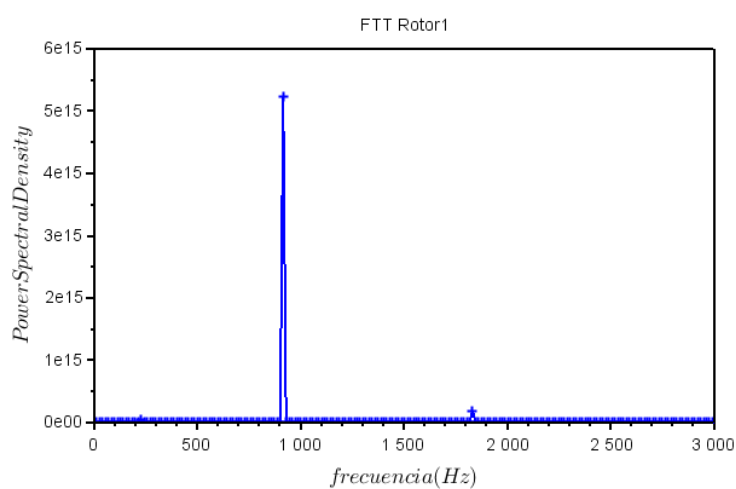


Figura 146. Freqüències monitor Rotor1 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

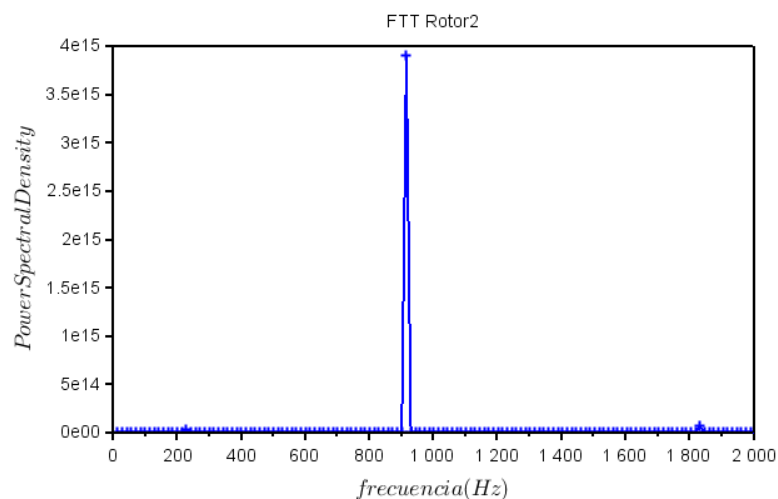


Figura 147. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

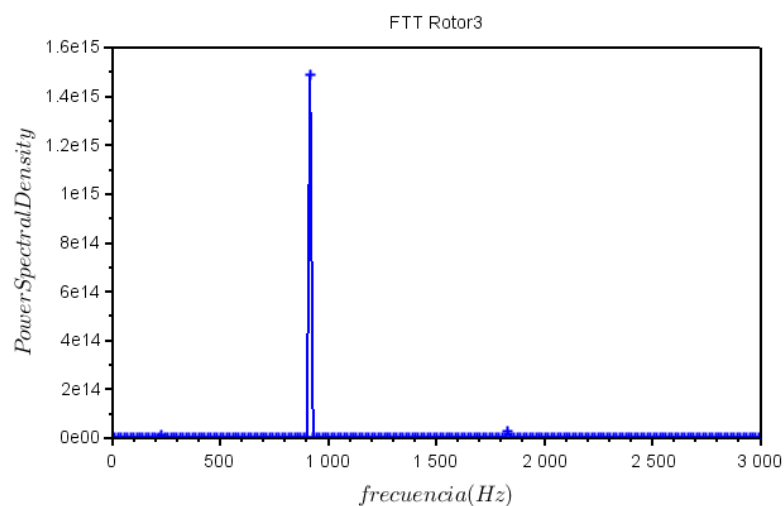


Figura 148. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

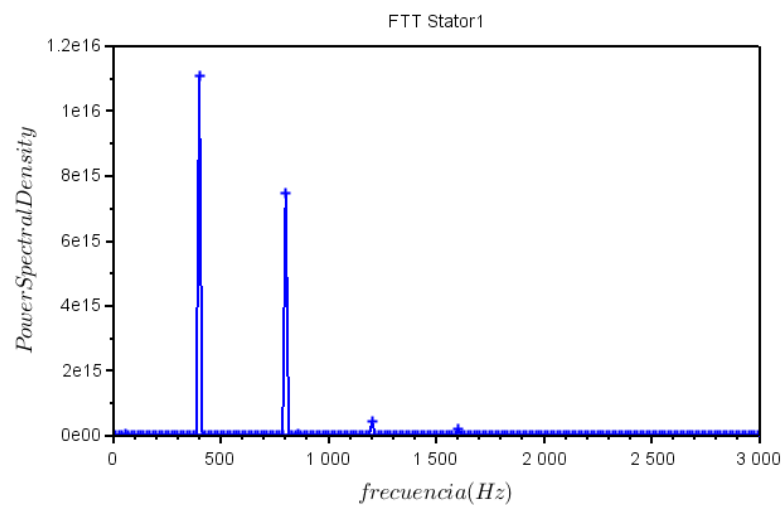


Figura 149. Freqüències del monitor Estator1 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

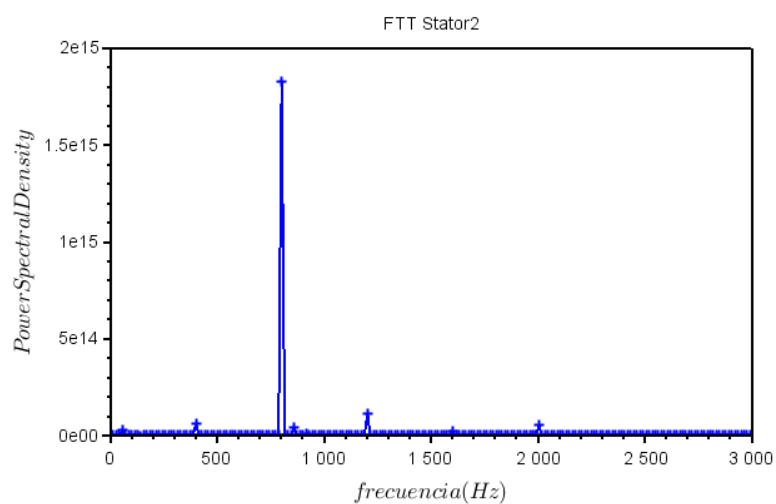


Figura 150. Freqüències del monitor Estator2 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

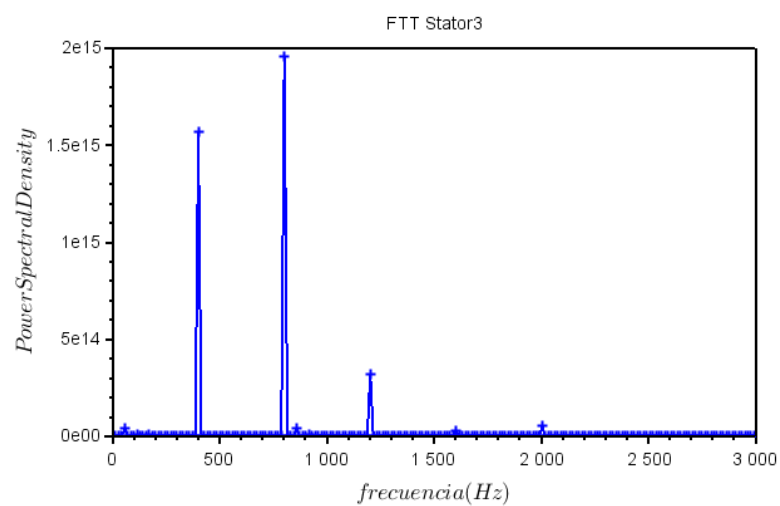


Figura 151. Freqüències del monitor Estator3 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

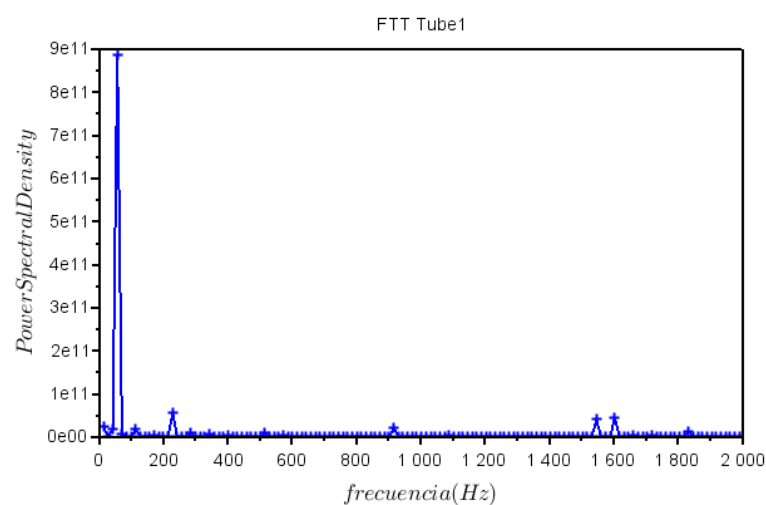


Figura 152. Freqüències del monitor Tube1 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

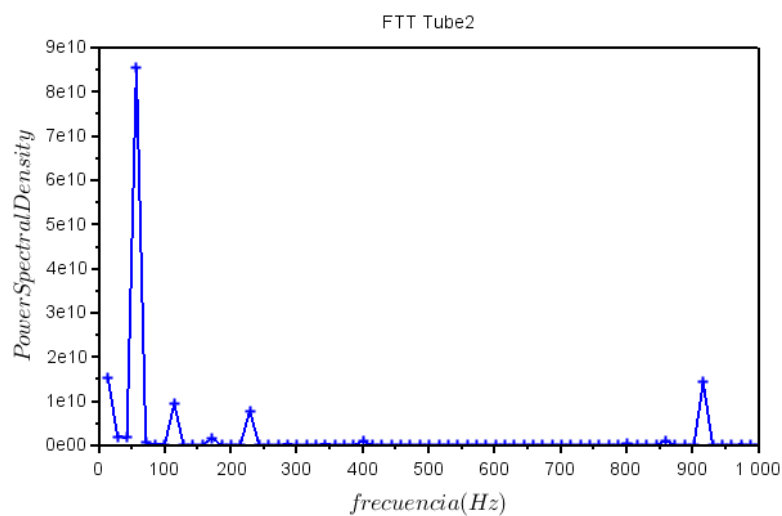


Figura 153. Freqüències del monitor Tube2 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

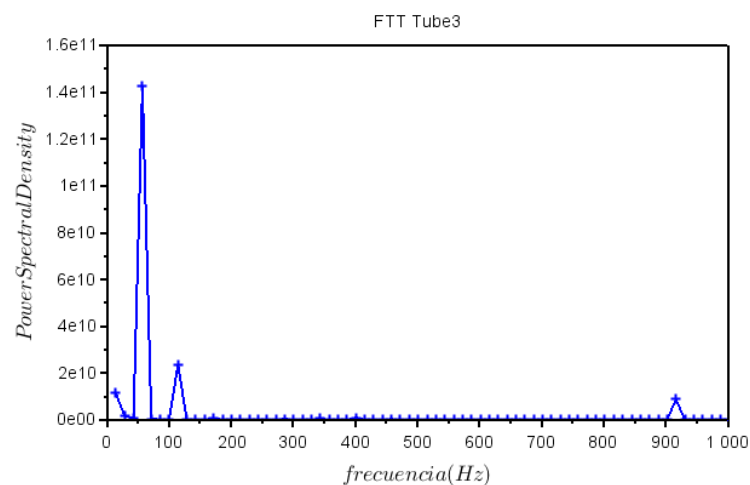


Figura 154. Freqüències del monitor Tube3 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

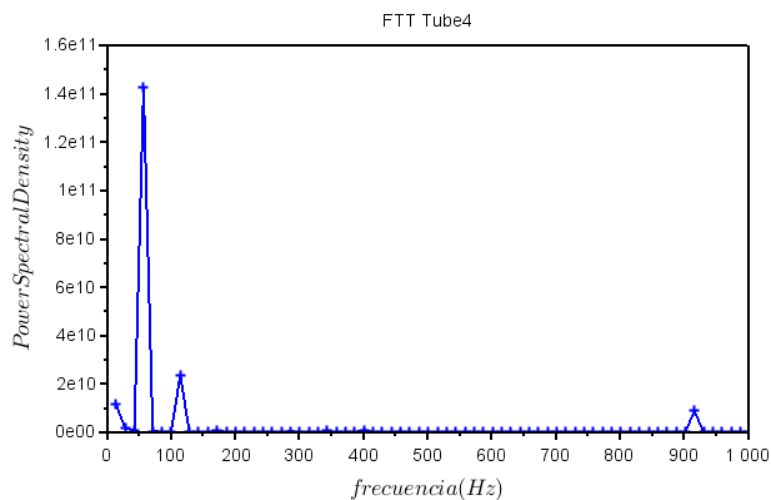


Figura 155. Freqüències del monitor Tube4 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

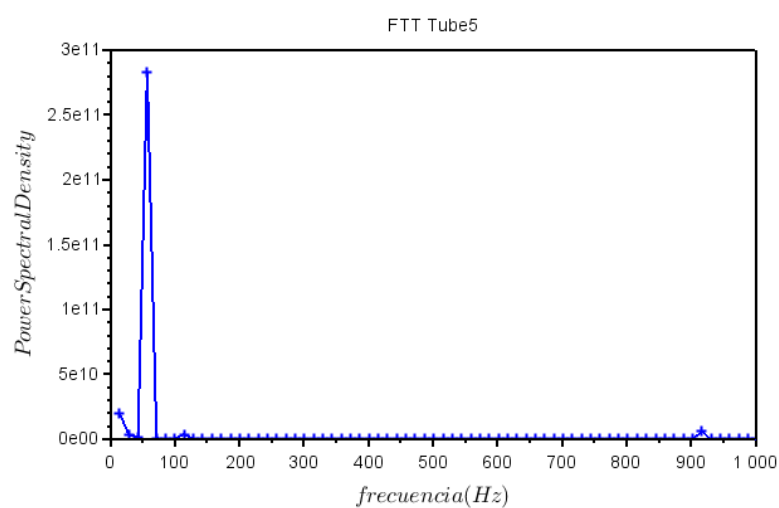


Figura 156. Freqüències del monitor Tube5 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

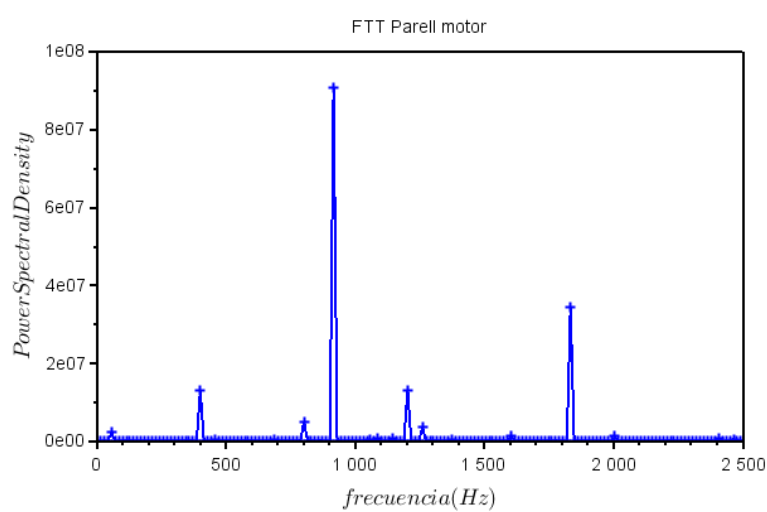


Figura 157. Freqüències del parell motor del rodet (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

A2.2. Geometria amb un àlep danyat

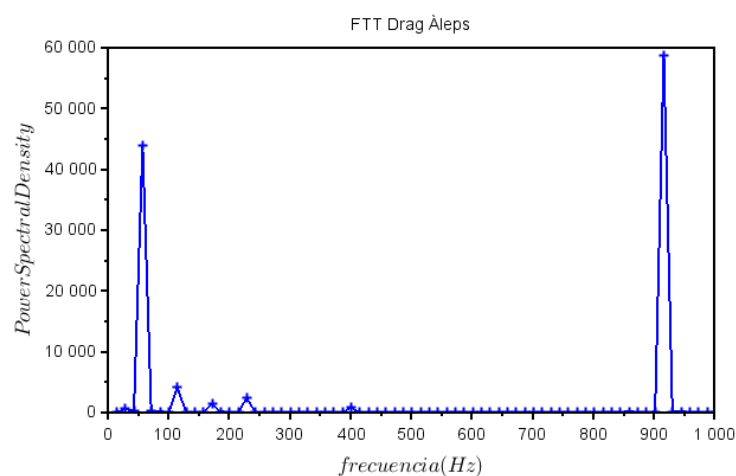


Figura 158. Freqüències del monitor Drag àleps (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

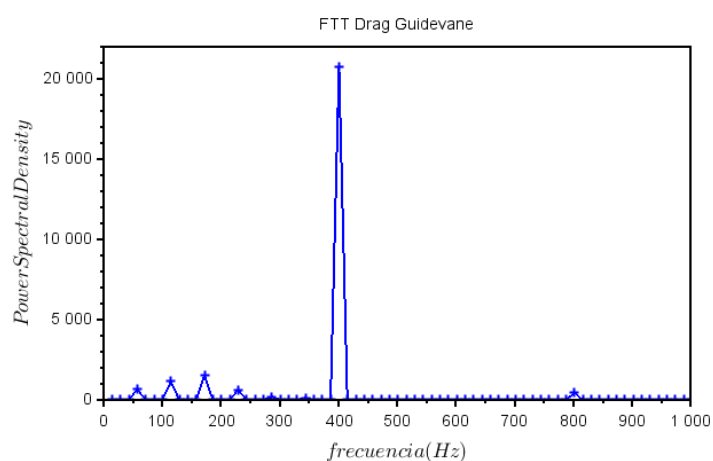


Figura 159. Freqüències del monitor Drag guidevanes (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

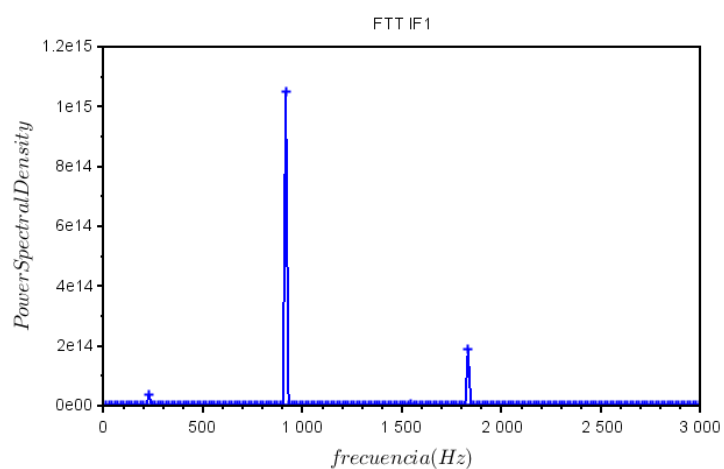


Figura 160. Freqüències del monitor IF1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

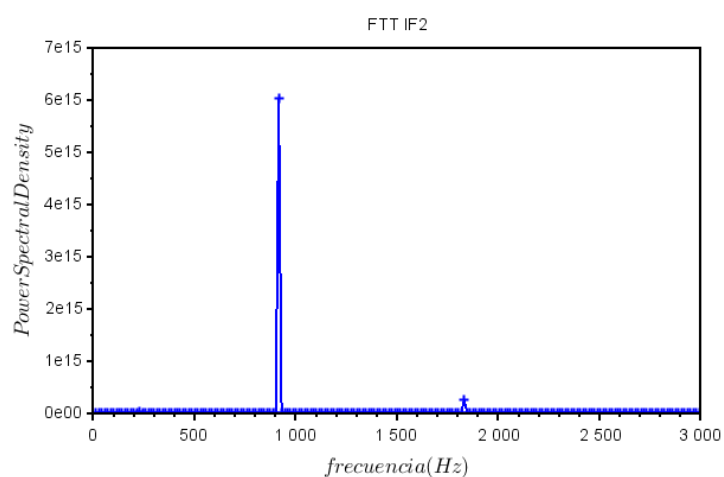


Figura 161. Freqüències del monitor IF2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

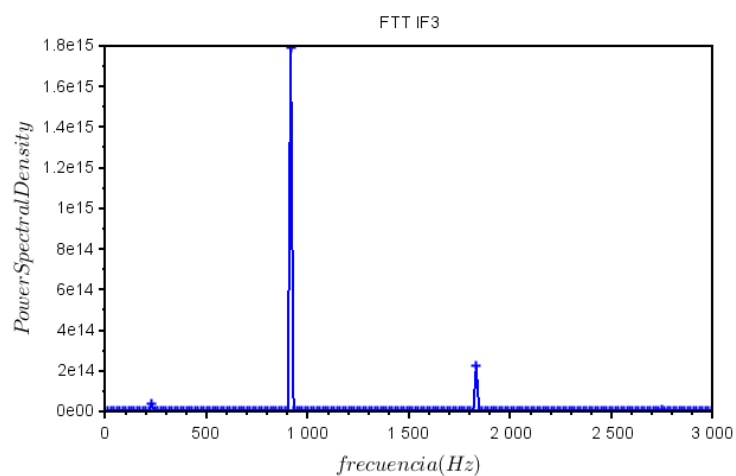


Figura 162. Freqüències del monitor IF3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

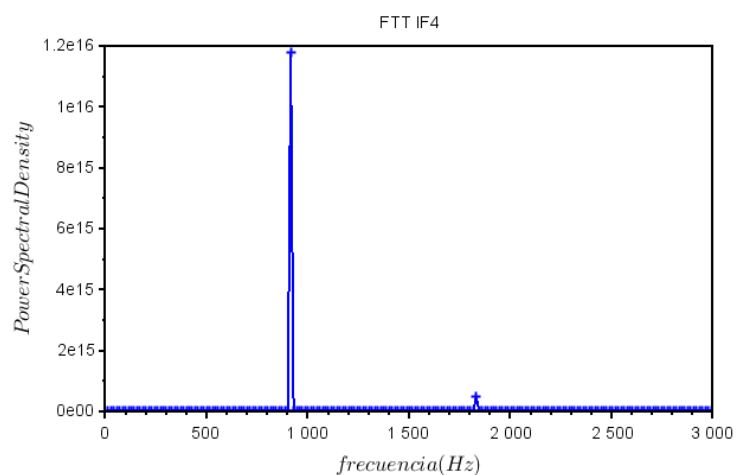


Figura 163. Freqüències del monitor IF4 (geometria original). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

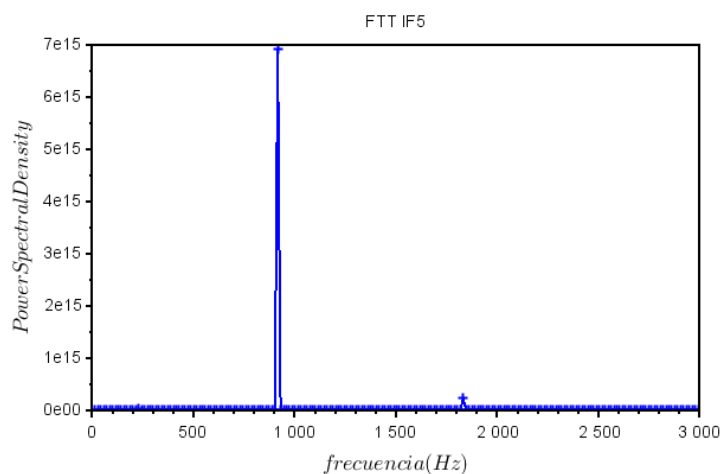


Figura 164. Freqüències del monitor IF5 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

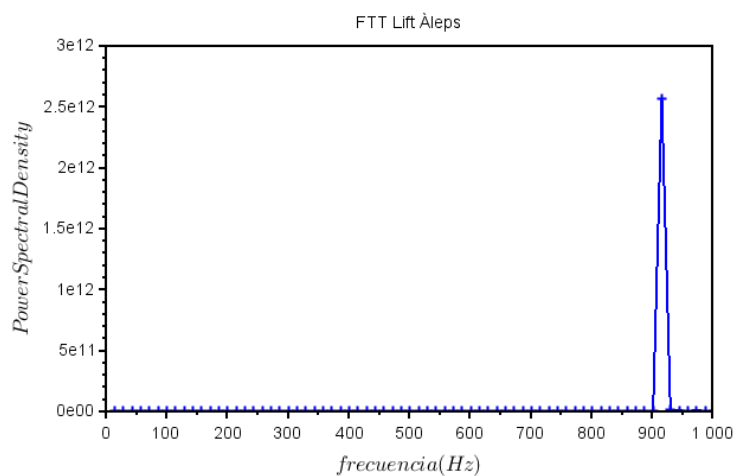


Figura 165. Freqüències del monitor Lift àleps (geometria d'una àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

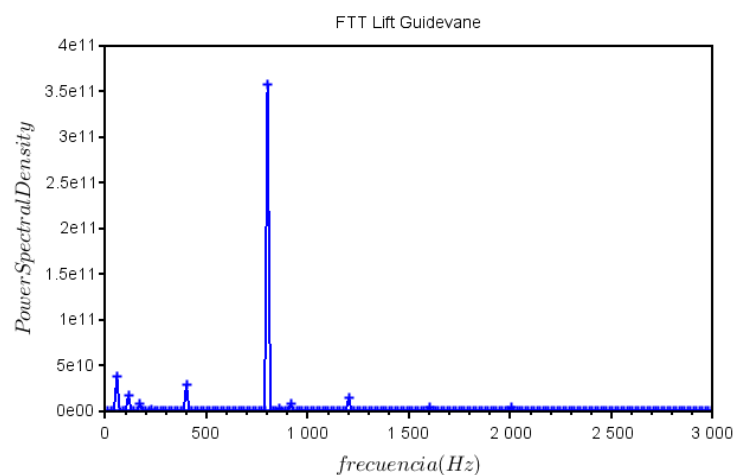


Figura 166. Freqüències del monitor Lift guidevanes (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

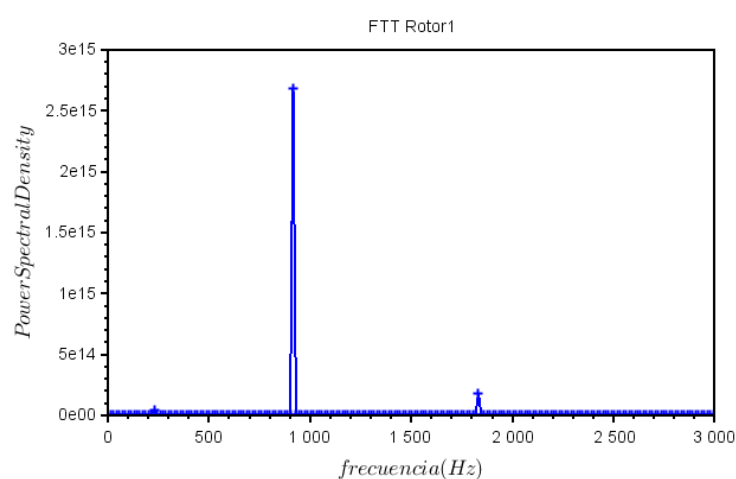


Figura 167. Freqüències del monitor Rotor1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

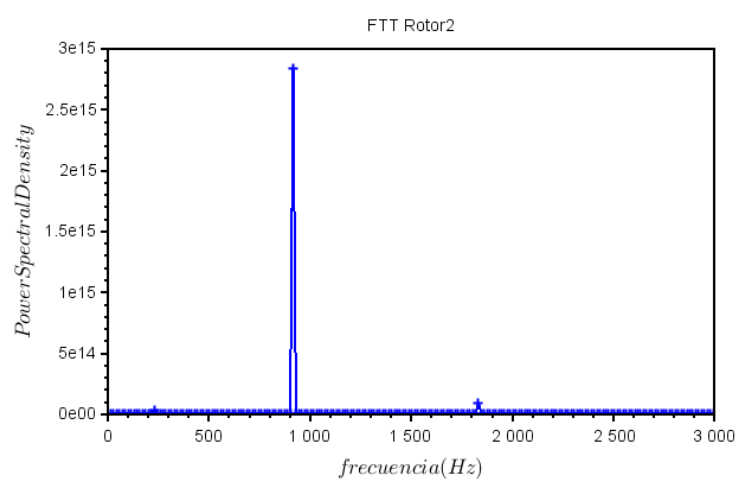


Figura 168. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

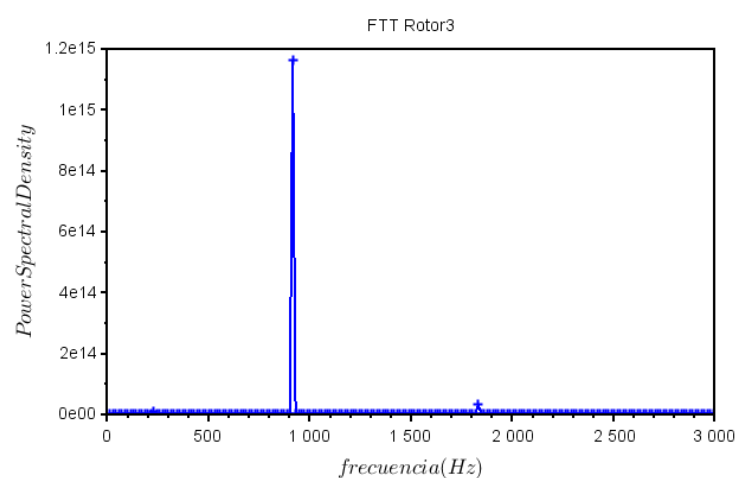


Figura 169. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

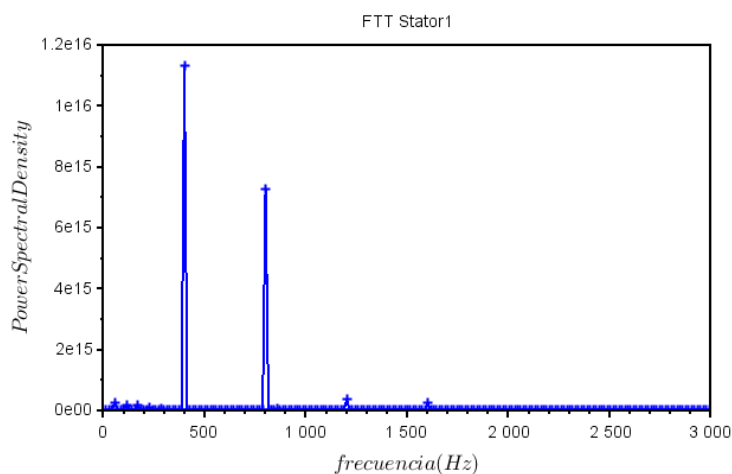


Figura 170. Freqüències del monitor Estator1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

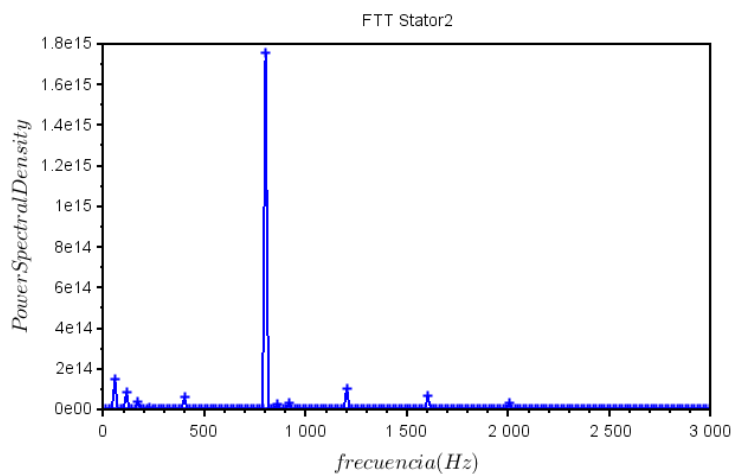


Figura 171. Freqüències del monitor Estator2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

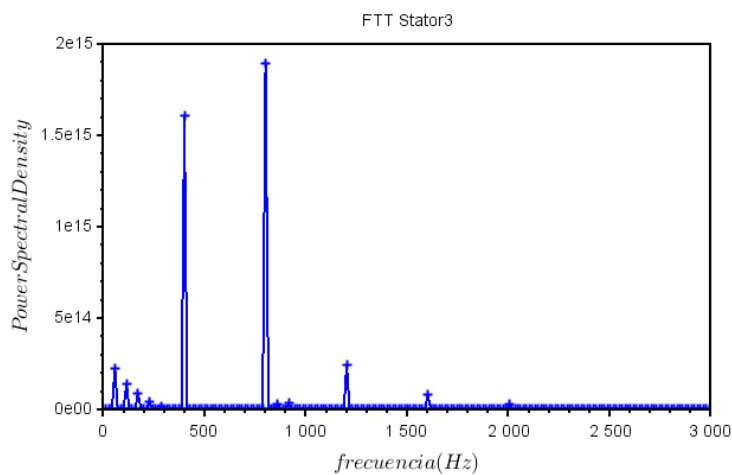


Figura 172. Freqüències del monitor Estator3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

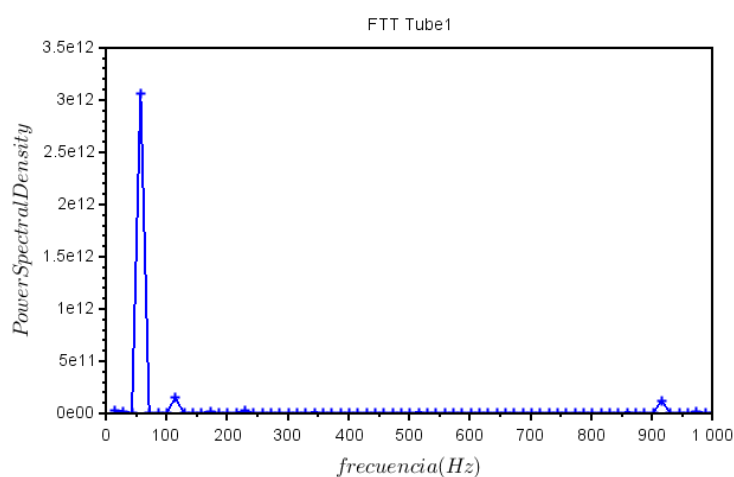


Figura 173. Freqüències del monitor Tube1 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

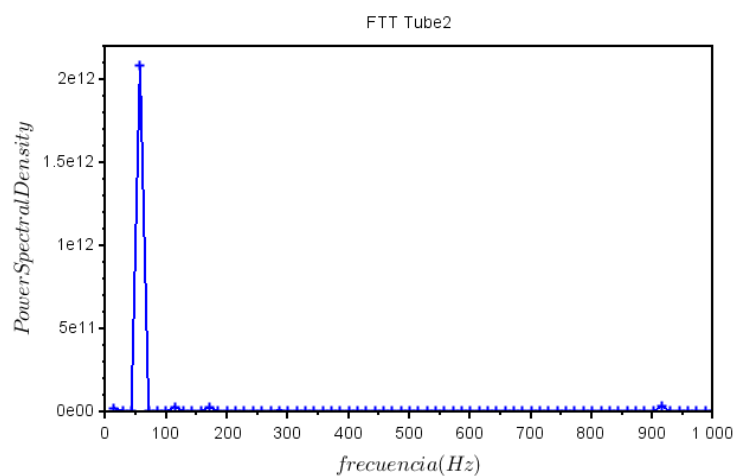


Figura 174. Freqüències del monitor Tube2 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

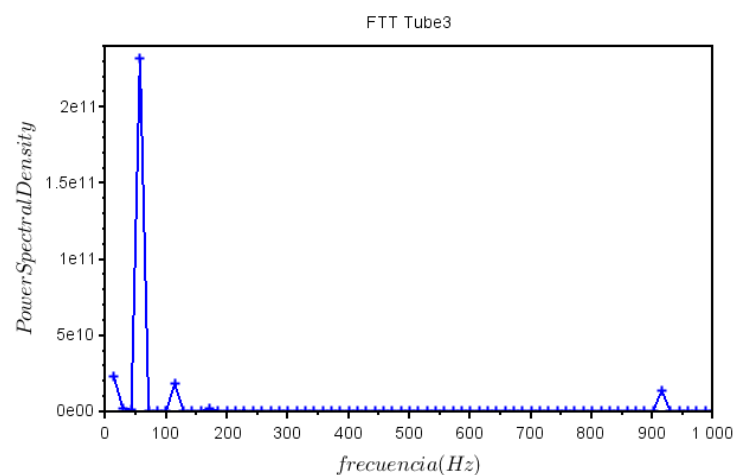


Figura 175. Freqüències del monitor Tube3 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

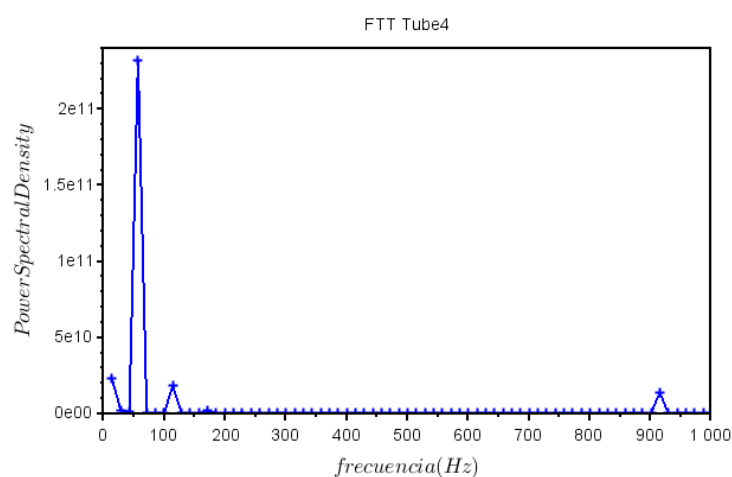


Figura 176. Freqüències del monitor Tube4 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

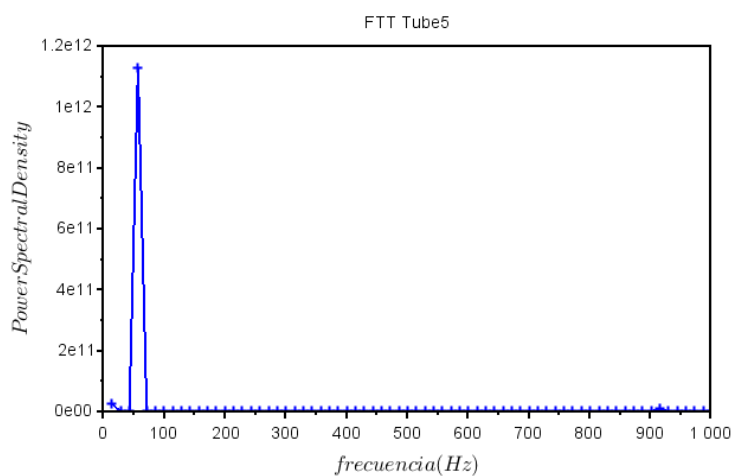


Figura 177. Freqüències del monitor Tube5 (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

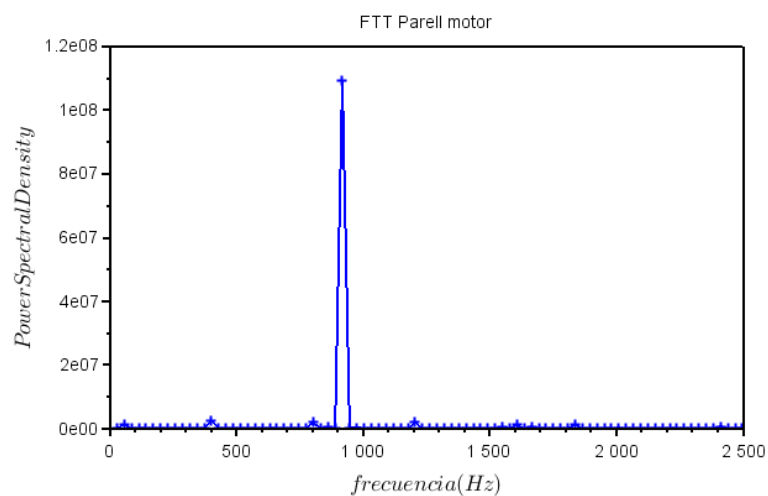


Figura 178. Freqüències del parell motor del rodet (geometria d'un àlep malmès). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

A2.3. Geometria amb tots els àleps danyats

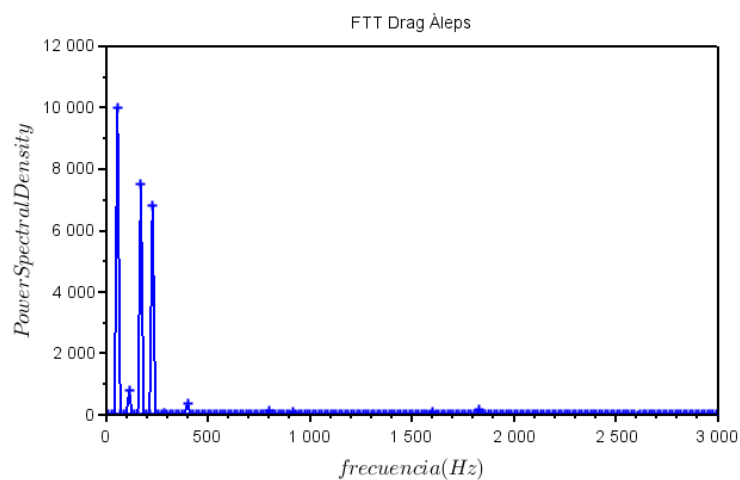


Figura 179. Freqüències del monitor *Drag* àleps (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

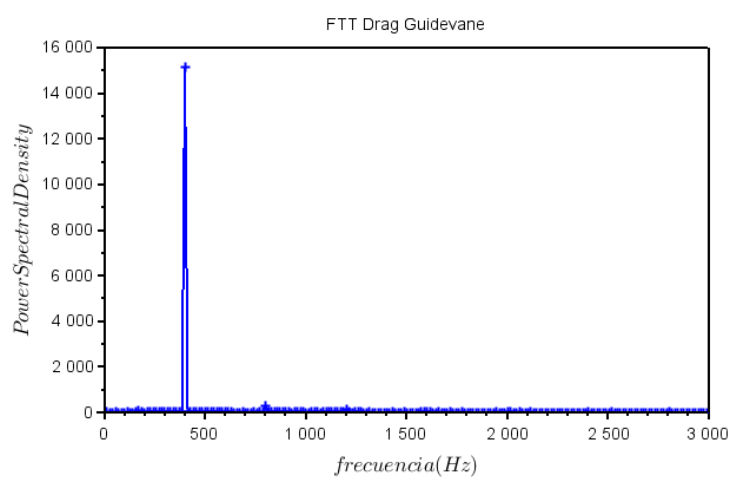


Figura 180. Freqüències del monitor *Drag* guidevane (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

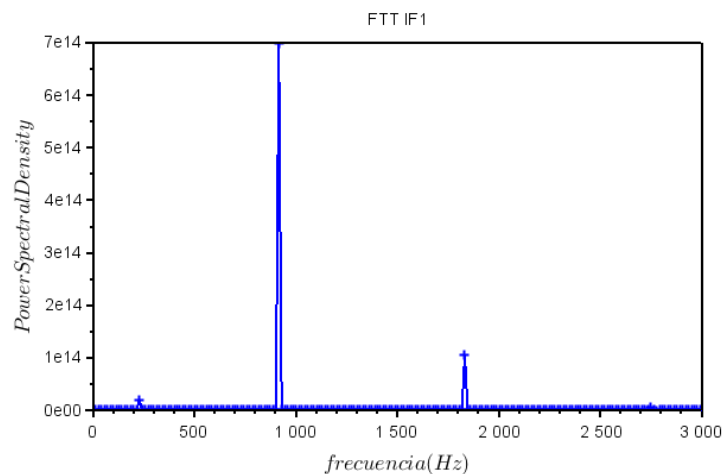


Figura 181. Freqüències del monitor IF1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

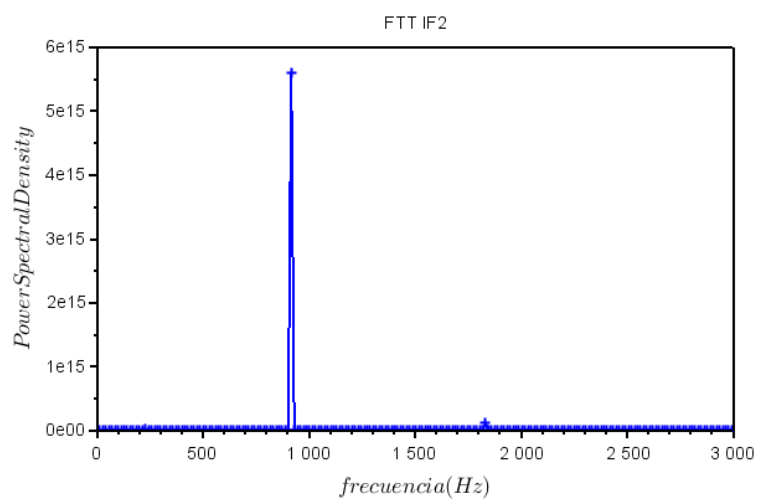


Figura 182. Freqüències del monitor IF2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

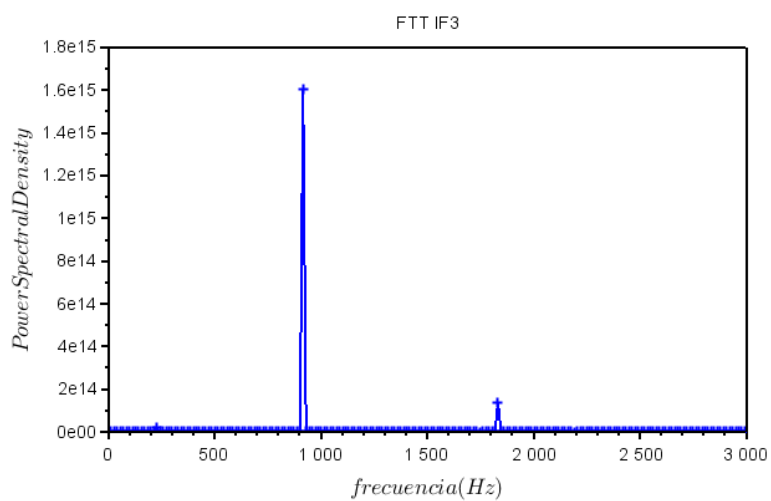


Figura 183. Freqüències del monitor IF3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

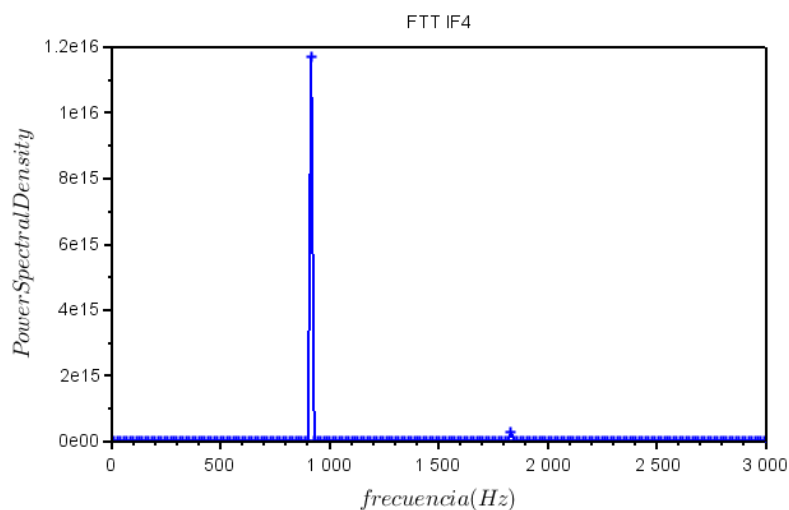


Figura 184. Freqüències del monitor IF4 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

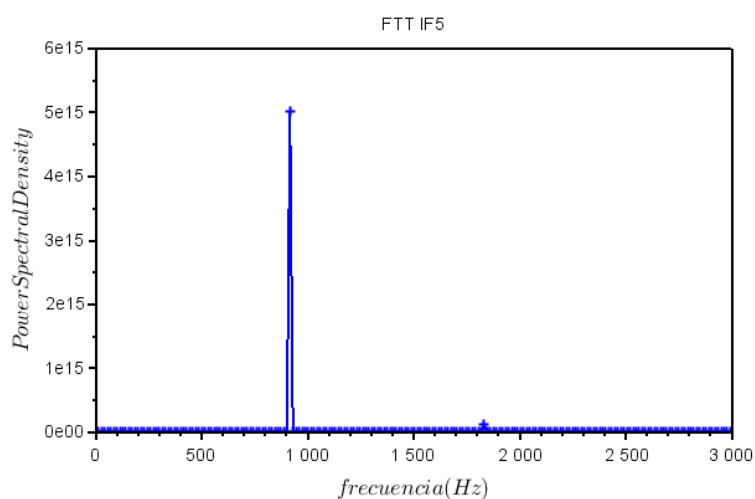


Figura 185. Freqüències del monitor IF5 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

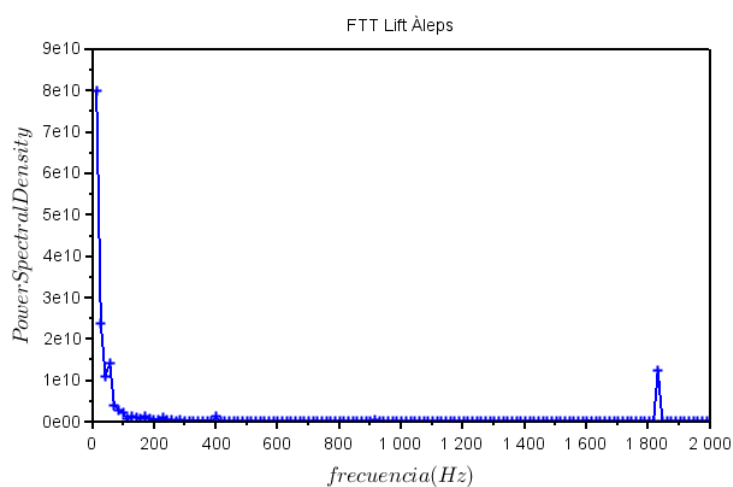


Figura 186. Freqüències del monitor Lift àleps (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

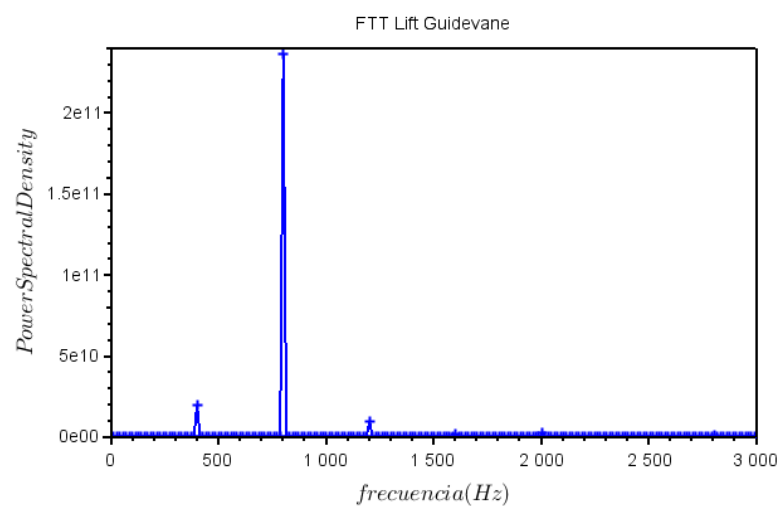


Figura 187. Freqüències del monitor *Lift guidevane* (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

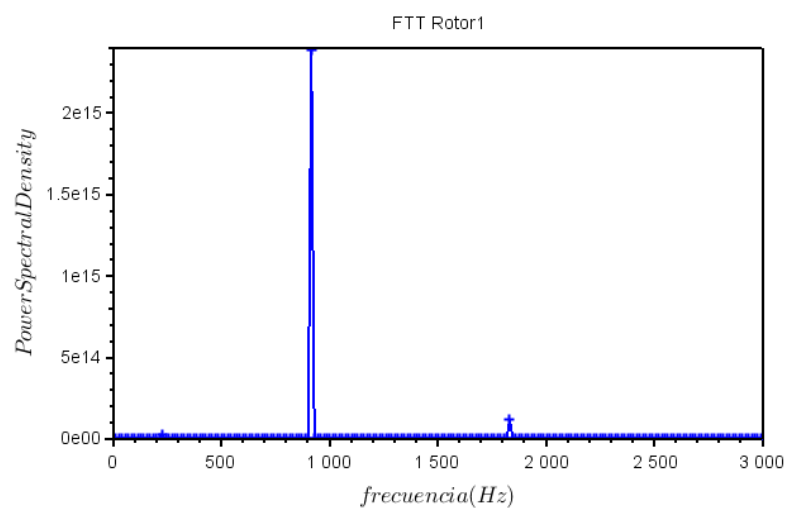


Figura 188. Freqüències del monitor *Rotor1* (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

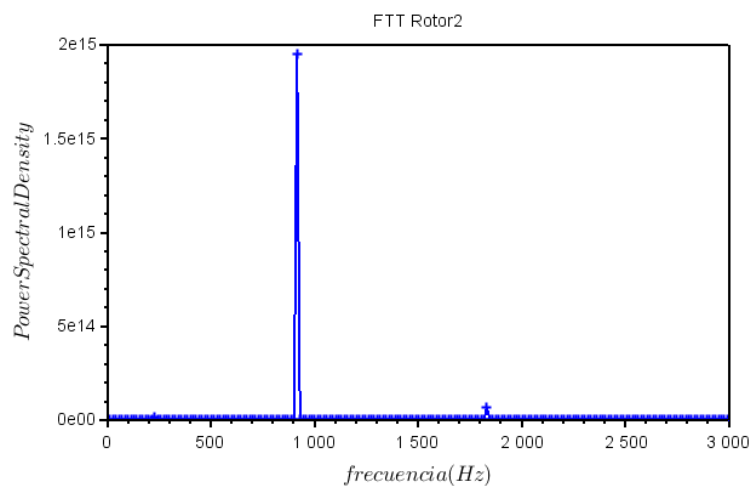


Figura 189. Freqüències del monitor Rotor2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

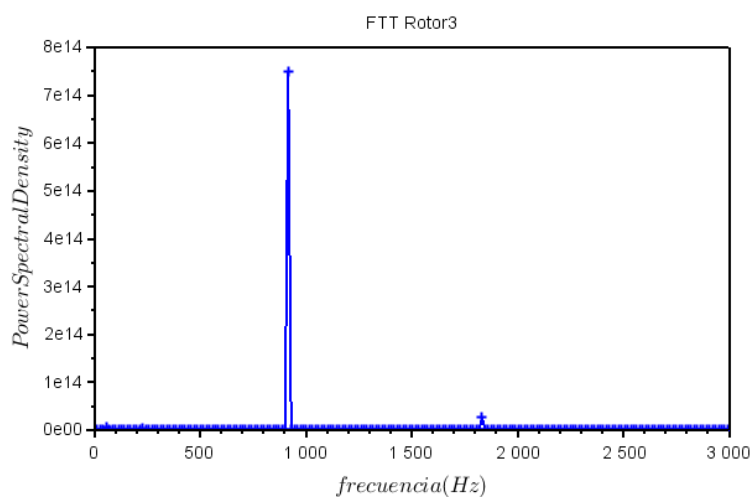


Figura 190. Freqüències del monitor Rotor3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

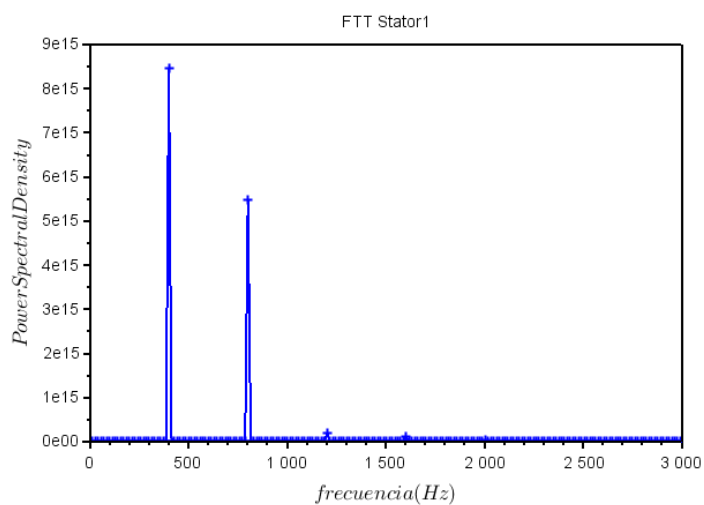


Figura 191. Freqüències del monitor Estator1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

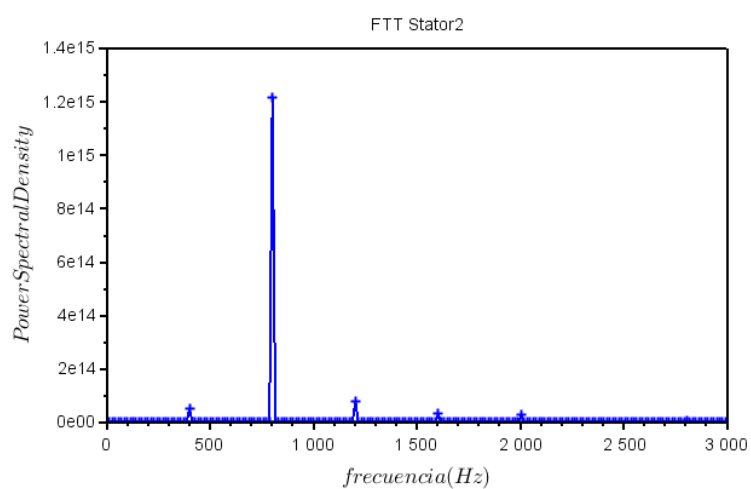


Figura 192. Freqüències del monitor Estator2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

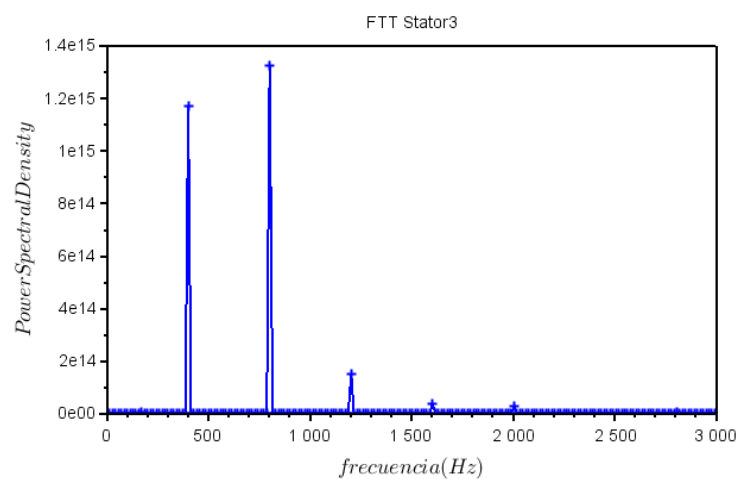


Figura 193. Freqüències del monitor Estator3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

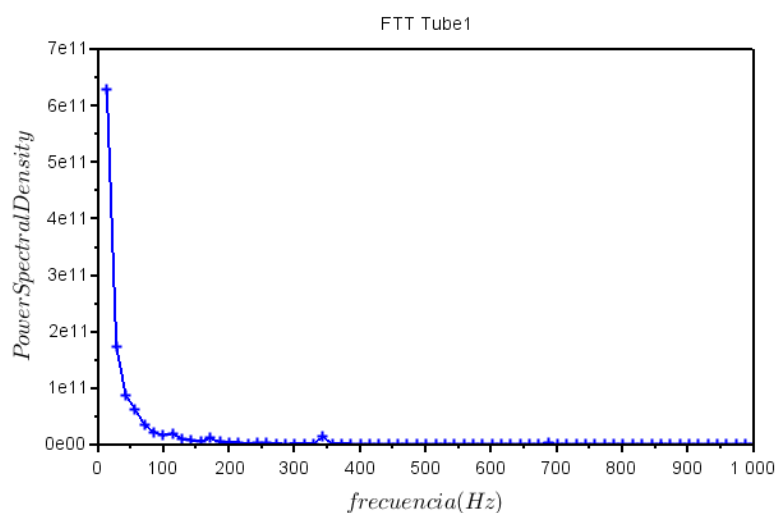


Figura 194. Freqüències del monitor Tube1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

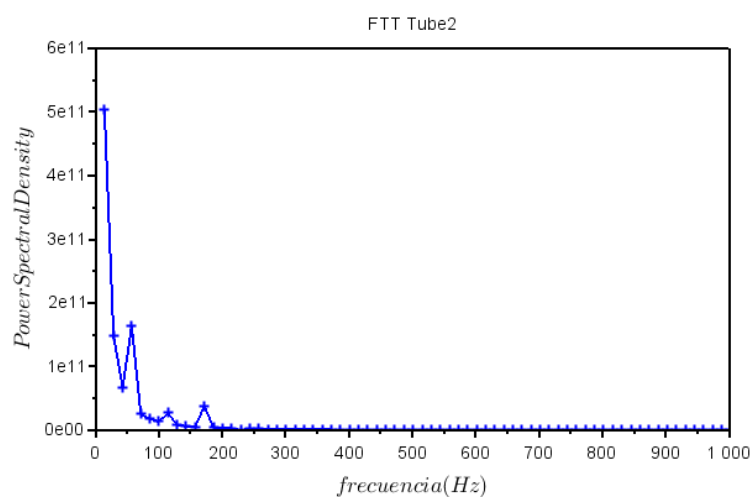


Figura 195. Freqüències del monitor Tube2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

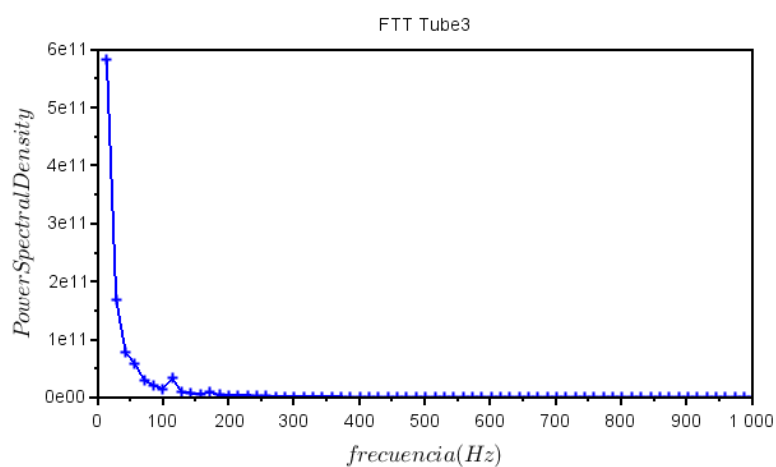


Figura 196. Freqüències del monitor Tube3 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

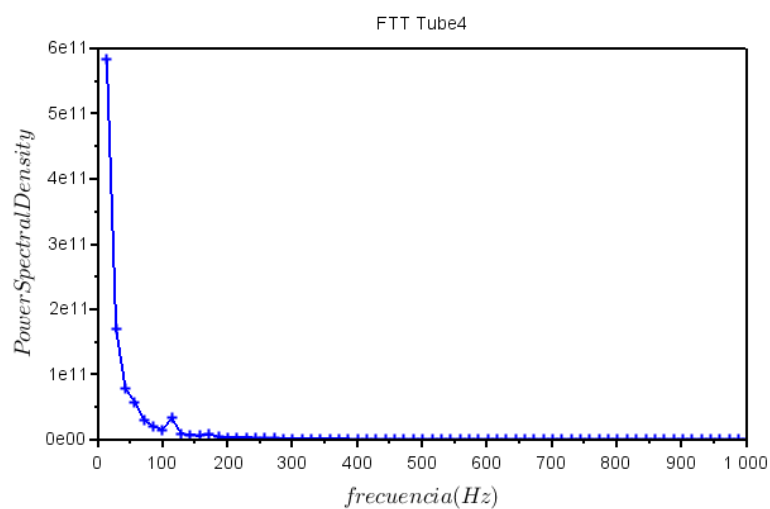


Figura 197. Freqüències del monitor Tube4 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

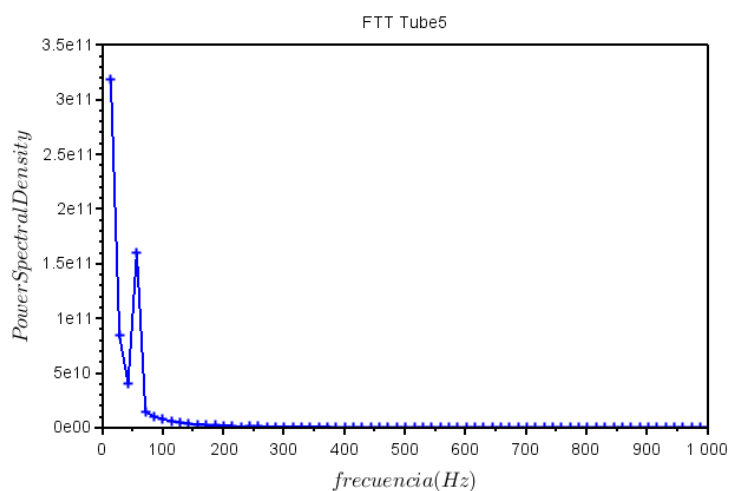


Figura 198. Freqüències del monitor Tube5 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

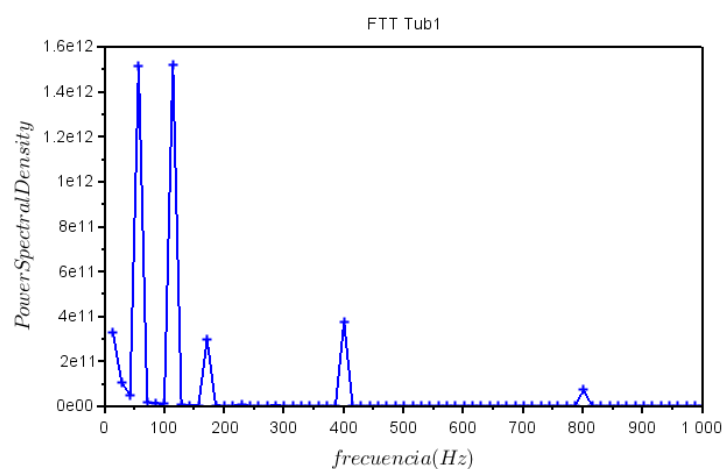


Figura 199. Freqüències del monitor Tub1 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

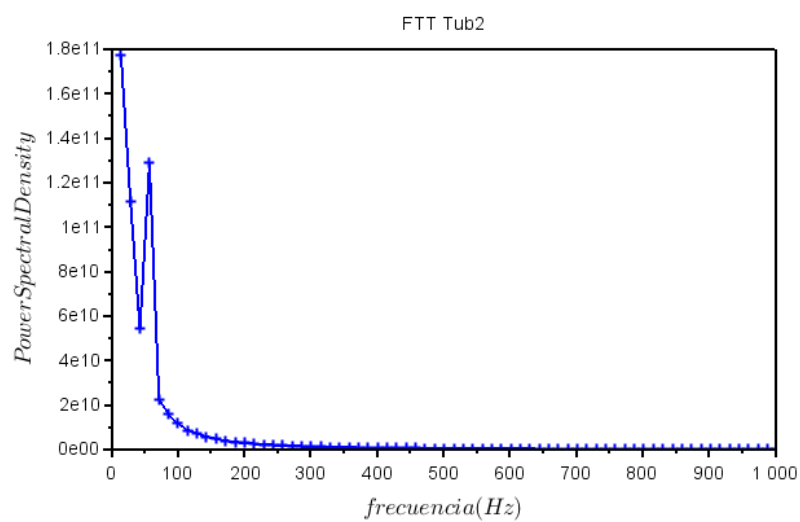


Figura 200. Freqüències del monitor Tub2 (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.

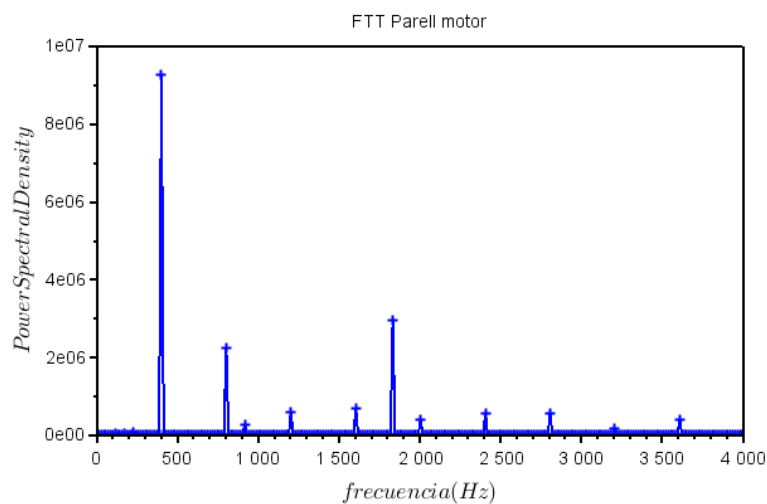


Figura 201. Freqüències del parell motor al rodet (geometria de tots els àleps malmesos). -Font: Elaboració pròpia amb Scilab.